studi avanzati: gli approfondimenti

Politecnico di Milano
Facoltà di architettura
Dipartimento di disegno industriale e di tecnologia dell'architettura

ATTILIO CITTERIO
mat. 165621

Tesi di laurea

Le materie plastiche di riciclo: proprietà, applicazioni, parametri progettuali. L'approccio metaprogettuale ai componenti edilizi

Relatori: Anna Mangiarotti e Claudio Chesi
Correlatore: Massimiliano Nastri

anno accademico 1995-1996

INDICE ARGOMENTI

Capitolo 2
LE MATERIE PLASTICHE

Capitolo 3
IL RICICLO DI MATERIE PLASTICHE

Capitolo 5
L'APPROCCIO METAPROGETTUALE

Si ringraziano:

Claudio Chesi e Anna Mangiarotti, per l'attenzione, la comprensione e la fiducia avute nei miei confronti;

Massimiliano Nastri, per la cura nell'impostazione e nella revisione della tesi;

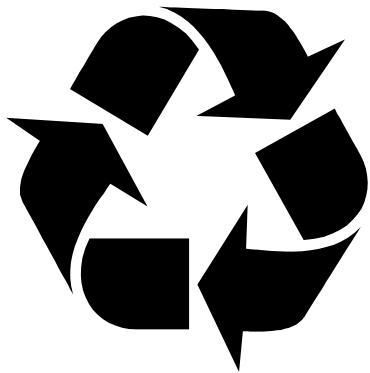
Guido Nardi, i docenti, i consulenti e i laureandi, per l'impegno nel laboratorio di laurea;

Antonio Addeo (CSI Montell), Walter Bazzo (ICI Polyurethanes), Stefano Canegallo (Pomini), Enrico Ceccarelli (Elf-Atochem), Roberto Centin (Stone), Sandro Cara (Basf), Erminio Del Monte (Pomini), Salvatore Di Carlo (Fiat Engineering), Domenico Di Diego (Huls), Roberto Galeazzi (Replastic), Costantino Giordano (EVC), Karlheinz Hausmann (Dupont), Francesco Paolo La Mantia (Università di Palermo), Bruno Marino (R.Eco.Plast), Luisa Morfini (ICITE),Luciano Pazzoni (RPE), Lucio Pinetti (Assorimap), Marta Rink (Politecnico di Milano), Camillo Scotto (SGM), Emilio Sitta (GE Plastics), per la disponibilità nei colloqui e il materiale messo a mia disposizione;

AIPE, Assocomaplast, Assoplast, Bayer, Big-mar, British Plastic Federation, CIBA Geigy, Coges, Fechiplast, Federchimica, Dow Chemicals, Dupont, Hoechst, National Recycling Coalition, OMP Prealpina, Recplast, Rohm and Haas Simona, Società Cadauta, Stabilobloc, Timbron, Vredestein, per il materiale inviatomi;

l'Istituto Italiano dei Plastici (IIP), per il contributo documentario tramite il Bollettino Bibliografico - Abstracts e i periodici messi a mia disposizione;

Sabino Leghissa, per la traduzione dei testi in lingua tedesca;

e, infine, un pensiero, con stima e gratitudine, a mia moglie, per aver condiviso con me, e più di me, la fatica e i sacrifici di questi cinque anni.

I. INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA SCIENTIFICO

Il duplice ruolo del progettista, l'evoluzione delle tecniche e dei materiali, la crisi del processo di apprendimento tradizionale, la consapevolezza tecnica del progettista, la complessità dell'attività progettuale contemporanea, il sapere trasversale, i materiali.

Il percorso concettuale lungo il quale si articola questa tesi è quello che considera la conoscenza delle tecniche esecutive (1) e dei materiali (2) come uno dei momenti fondamentali per la legittimazione dell'insieme di atti tecnici sottesi a una costruzione (3): il progettista, in quanto tramite tra istanze culturali, sociali e simboliche della collettività e costruito, lettore consapevole e interprete di cultura (4), deve essere in condizioni di poter governare l'intero processo progettuale, che va dall'ideazione fino all'esecuzione dell'opera, con la capacità di saper dialogare e interloquire in maniera competente, e trasversale, con i diversi attori del processo stesso (5). All'interno di questa duplice relazione, progettista-collettività e progettista-operatori, gli aspetti evolutivi che caratterizzano la realtà tecnica del contesto del progetto contemporaneo (6) portano l'attività progettuale a dover gestire diversi livelli di complessità (7): in questo senso il progetto si deve confrontrare con l'immissione sul mercato di tecniche innovative e di nuovi materiali caratterizzati da un alto contenuto informazionale (8) e prestazionale, immissione che, da un lato, mette in crisi il processo di apprendimento tradizionale, basato sulla ripetizione e sedimentazione dell'esperienza, ostacolando il formarsi di una cultura tecnica omogenea, diffusa, e condivisa tra i diversi operatori (9), e, dall'altro lato, fa sì che il processo decisionale, all'interno dell'attività progettuale, non appartenga più alla singola figura del progettista ma veda l'interazione fra diverse competenze, in diversi settori disciplinari. Di fatto, si rende necessaria una consapevolezza tecnica, da parte del progettista stesso e di tutti gli operatori, molto superiore a quella di una attività costruttiva basata su un minor numero di materiali e su tecniche di tipo tradizionale; il progetto innovativo, in quanto espressione dell'insieme di tutte le competenze che contribuiscono alla fattibilità tecnica dell'idea iniziale, non si presenta più come soluzione univoca, ma lascia spazio a diverse modalità di realizzazione, legate a diverse tecniche esecutive e a diversi materiali, sviluppate con l'intervento sinergico del progettista, degli operatori coinvolti, delle industrie fornitrici (10). Così definita, la complessità dell'attività progettuale delinea la figura del progettista, fra tutti gli operatori, come regista del sistema all'interno di una situazione caratterizzata dalle logiche della

variabilità e della molteplicità dei fattori in azione, situazione che si lega alla difficoltà a gestire saperi sempre più specifici e specializzati e, quindi, alla necessaria apertura di nuovi canali di comunicazione tra ambiti tecnologici differenti: in ultima analisi si tratta di definire un sapere trasversale capace di mettere in relazione mondi e linguaggi tecnici diversi, affinché tra le diverse figure che operano nel contesto costruttivo contemporaneo si stabilisca una reciproca conoscenza di ciò che ciascuno sa e può fare.
All'interno di questo percorso concettuale, che considera il ruolo del progettista in relazione all'evoluzione nel settore delle costruzioni, questa tesi intende focalizzare l'attenzione sulle tematiche inerenti i materiali, ritenendo lo studio e l'analisi dei materiali, l'innovazione tecnologica nella loro realizzazione e nel loro utilizzo, fra i principali elementi di rinnovamento nella progettazione architettonica e nel processo edilizio; in quest'ottica si impongono, per un corretto inquadramento del problema scientifico, alcune riflessioni sui rapporti tra materia e materiale (Par. I.I), per i significati semantici che esso riveste, e tra naturale e artificiale (Par. I.II), per le nuove responsabilità che tale rapporto implica nell'attività progettuale. In merito a queste riflessioni è, infine, necessario inquadrare il tema della progettazione del materiale (Par. I.III), con lo specifico riferimento alle materie plastiche oggetto di questa analisi, alla luce delle relazioni che con essa si instaurano all'interno del processo progettuale (Par. I.IV).

I.I Materia e materiale

Il rapporto tra materia e materiale, la progettazione del materiale, la sfera culturale, il campo delle conoscenze del progettista, la sperimentazione e la ricerca sui materiali come momento centrale della poetica, il progetto come campo privilegiato della riflessione sui materiali.

Una riflessione di tipo semantico sui termini materia (11) e materiale può aiutare a chiarire quale deve essere un corretto atteggiamento progettuale nel contesto evolutivo contemporaneo. Il rapporto tra materia e materiale, infatti, riveste particolare importanza per due ordini di motivi: il primo è che nel passaggio da materia a materiale, si considera implicita la volontà esterna di qualcosa o qualcuno che, perseguendo un obiettivo, prepara la materia intervenendo su di essa; una azione inscritta, soprattutto, "nell'ambito del rapporto dell'uomo con la natura: tutto ciò che in quest'ultima riveste qualche utilità ai fini del soddisfacimento di certi bisogni può diventare materia di trasformazione, materia prima" (Wyrobisz, 1979, pp. 959)

(12). Il secondo ordine di motivi è che, in linea di principio, con i nuovi materiali questo passaggio arriva ad acquistare valenze progettuali: è il concetto di materiale su misura, "appositamente messo a punto per un determinato impiego, specializzazione in determinati campi applicativi, complesso di prestazioni, materiale progettato" (Manzini, 1986, p.37) (13). Ragionare sul rapporto tra materia e materiali coinvolge, quindi, da una parte la sfera culturale, in quanto tale rapporto porta con sè valenze sociali, di tecnica e di economia da cui è inseparabile (affinché la risorsa "materia" diventi "materiale" è necessario che l'uomo elabori una tecnica per appropriarsene) (14); dall'altra parte coinvolge il campo delle conoscenze del progettista, in quanto l'utilizzo dei nuovi materiali è legato a un sistema di riferimento adeguato alle loro proprietà intrinseche (diventa importante la "conoscenza specifica", affinché il "linguaggio" del progettista sia in sintonia con quello del materiale, per poterne meglio sfruttare le potenzialità) (15). Per il progettista, la sfera culturale e il campo delle conoscenze evidenziano nella ricerca e nella sperimentazione sui materiali uno dei momenti centrali di una poetica (16) tesa all'uso corretto dei mezzi a disposizione: all'interno di questo quadro la cultura tecnologica (17) del progettista può basarsi solo sulla abitudine a intendere il progetto come campo privilegiato della riflessione congiunta e trasversale di differenti saperi ed esperienze, fra cui quella fondamentale dei materiali.

I.II Naturale e artificiale

Il rapporto dicotomico tra naturale e artificiale, il carattere etico delle scelte progettuali, artificiale e sfera tecnica, la conflittualità con la natura, la tecnica come mediazione, i tempi dell'evoluzione, la perdità di riconoscibilità dei materiali, il compito del progettista tra tempi dello sviluppo tecnico e sapere collettivo.

L'evoluzione tecnico-scientifica, e la proliferazione di nuovi materiali che a questa evoluzione si accompagna, ripropone, ricco di nuovi significati, il rapporto dicotomico tra naturale e artificiale: da un lato, l'illimitata capacità risolutiva, che pare investire il contesto tecnologico contemporaneo, porta a riflettere sul carattere etico (18) delle scelte progettuali, comunque tese a modificare la realtà naturale in artificiale, relative all'uso di tecniche innovative e alla manipolazione sui nuovi materiali; dall'altro lato, occorre sottolineare come l'azione dell'uomo, prerogativa dell'artificiale, sia passata da un livello macroscopico, relativo alla pura modificazione geometrica dei materiali, a un livello microscopico, arrivando a intervenire sulle

loro qualità intrinseche. Da queste prime considerazioni deriva l'importanza dell'approfondimento del rapporto tra naturale e artificiale, al di là della contrapposizione antitetica dei due termini (19), in quanto legato alla sfera tecnica e, in particolare, al livello tecnico con il quale l'artificiale viene creato. L'artificiale fa parte della tecnologia perché, affinché se ne possa parlare, è necessaria l'azione dell'uomo tesa a riprodurre, sul piano tecnologico e con materiali diversi, un esemplare esistente in natura (Negrotti, 1995): quindi, il naturale, o meglio ancora, l'esigenza umana di superare la conflittualità con la natura, diventa prerogativa indispensabile alla trasformazione in artificiale, e in questa trasformazione la tecnica assume il ruolo di mediazione, "in quanto qualsiasi atto tecnico costituisce un passo ulteriore verso l'artificializzazione dell'ambiente circostante" (Campioli, 1993, p. 23). Ma l'attinenza alla sfera tecnica non è ancora sufficiente a spiegare alcune differenze di percezione, in riferimento alla dualità naturale-artificiale, nel caso dei materiali: a esempio, non chiarisce come mai il legno del tavolo, che pure è un materiale lavorato, ci appaia più naturale, o meno artificiale, della plastica della sedia. Per spiegare questa differenza è necessario riferirsi al livello tecnico che concorre alla trasformazione di un materiale: ciò che cambia, nel legno rispetto alla plastica, o più in generale, nei materiali tradizionali rispetto a quelli innovativi, sono i tempi secondo i quali si evolvono le regole di tale trasformazione, regole che, da una parte, sono quelle dell'evoluzione legata alle leggi fisiche e biologiche del nostro pianeta, oppure quelle legate alla cultura materiale, dall'altra parte diventano quelle della manipolazione legata al progresso tecnico-scientifico. Nel contesto tecnologico contemporaneo la trasformazione dei materiali, dei processi di lavorazione e delle relative conoscenze, mettono in discussione i tradizionali meccanismi di riconoscibilità dell'artificiale, non solo per la complessità di tali trasformazioni ma anche, e soprattutto, per la loro velocità: sono, infatti, "i nostri ritmi biologici, la durata dei cicli individuali di apprendimento e di risposta, i tempi sociali di formazione dei modelli di pensiero e delle forme di linguaggio, che, incontrandosi e scontrandosi con i ritmi accellerati della trasformazione tecnica, producono una sorta di crisi della conoscibilità e riconoscibilità dell'ambiente in cui siamo immersi" (Manzini, 1986, p. 27). Queste considerazioni investono l'attività progettuale, perché preposta alla produzione di oggetti artificiali, di nuove responsabilità etiche e culturali: al progettista, infatti, spetta il compito di mediare i tempi dello sviluppo tecnico con quelli del sapere collettivo e, in questo senso, si ripropone la necessità, da

parte del progettista stesso, di riappropriarsi del controllo sugli aspetti tecnologici del progetto, come unica via per sottrarre quest'ultimi a quegli interessi o fini particolaristici, che, troppo spesso, pongono la produzione come unica finalità dell'agire dell'uomo.

I.III La progettazione del materiale: il caso delle materie plastiche

La progettazione preventiva dei materiali, la responsabilità del progettista, le qualità fisico-meccaniche dei materiali, i vincoli al contorno dell'attività progettuale, la categoria delle materie plastiche, l'ascesa delle materie plastiche e la crisi della comprensione tecnica del progettista, l'identità artificiale.

L'evoluzione tecnologica influenza notevolmente la produzione nel campo dei materiali, caricandola di valenze progettuali, e definisce nuovi caratteri alla dimensione artificiale degli stessi: il primo aspetto consente, in parte, di superare i vincoli che le caratteristiche intrinseche del materiale impongono alla progettazione, in quanto permette la produzione di materiali che siano corrispondenti a specifici impieghi; nel contempo, il secondo aspetto evidenzia il problema della perdità di riconoscibilità dei nuovi materiali legata alla velocità nella loro evoluzione, mettendo in crisi una delle certezze del pensiero moderno (20). Quindi, tra i caratteri del contesto costruttivo contemporaneo, emerge, in tutta la sua importanza, la progettazione preventiva del materiale, e, in questo quadro, al progettista spetta la responsabilità di gestirne le prestazioni, i possibili modi d'uso e i significati simbolici: capacità inventiva e ricerca scientifica si fondono sinergicamente nel progetto, che diventa espressione del lavoro parallelo tra soluzioni formali e tecniche. In questo senso, il terreno della progettazione diventa anche quello, legato alla sintesi degli effetti legati alle qualità fisico-meccaniche dei singoli materiali, teso ad affiancare diversi materiali per ottenerne nuove prestazioni: compatibilità chimica, fisica e meccanica, e durabilità dei materiali diventano oggetto dello studio e della ricerca del progettista che vede aumentare i vincoli al contorno della propria attività e, nel medesimo tempo, deve necessariamente ampliare il campo delle proprie conoscenze. La categoria delle materie plastiche è, forse, il caso più evidente della contrapposizione tra valenze progettuali e riconoscibilità del materiale, e tra vincoli e possibilità del progettista: la struttura del materiale polimerico si presta a essere manipolata per ottenere nuove e maggiori prestazioni; l'elevata formabilità

consente l'integrazione, in un unico pezzo, di più funzioni (21); ma, paradossalmente, la rapida ascesa del ruolo delle materie plastiche impedisce al progettista, per la prima volta in modo così evidente, la comprensione delle caratteristiche del materiale, allontanandolo anche dalla fase di verifica prestazionale sul prodotto; inoltre, le intrinseche qualità adattive e mimetiche, che fanno della duttilità d'immagine una prerogativa delle materie plastiche, hanno portato la cultura collettiva a interiorizzare questi materiali, più che per la loro reale identità materica, come simbolo della società dei consumi, materiali 'finti', 'artificiali', 'qualitativamente inferiori' (22). Tutto ciò rende le materie plastiche, se riferite al campo architettonico, una famiglia molte volte trascurata dai progettisti che non si sentono storicamente supportati nell'applicazione e nella scelta di questi materiali nel progetto, nonostante oggi la ricerca e il bagaglio di esperienze sul loro comportamento permettano di 'dominarli' al pari di un materiale tradizionale.

I.IV La questione dei materiali nel processo progettuale.

La questione dei materiali e la cultura tecnologica della progettazione, i fattori contestuali, l'adeguamento delle conoscenze al mutare dello scenario tecnologico, la comprensione delle caratteristiche intrinseche dei materiali, cultura e prassi multidisciplinari, il progettista come chiave del sapere tecnico.

Le considerazioni fin qui fatte portano a inquadrare la questione dei materiali, nel processo progettuale contemporaneo, all'interno del concetto di cultura tecnologica, tenendo conto che il ruolo del progettista rimane quello di saper interpretare e trasformare i materiali nel contesto culturale nel quale si trova a operare (23): infatti, la gestione dei materiali nel progetto si manifesta in relazione a fattori contestuali che risiedono fuori dal progetto stesso, nella cultura, nella tecnica, nell'economia, nel luogo, nel tempo. In tal senso, è di fondamentale importanza che il progettista adegui le proprie conoscenze al rapido mutare dello scenario tecnologico, e si conferma, in tutta la sua attualità, la considerazione del filosofo tedesco Theodor W. Adorno (1965) che qualsiasi attività artistica nel senso più ampio del termine esige una conoscenza dei materiali e delle tecniche disponibili estremamente esatta (24). Oggi, più che in passato, l'estrema varietà delle forme di utilizzo che caratterizza i vari settori industriali ha raggiunto livelli di complessità tali da impedire una comprensione realistica delle caratteristiche intriseche dei materiali senza una conoscenza generale e ragionata dello scopo e del settore specifico di utilizzo: tali materiali si vanno progressivamente dotando di un valore aggiunto informazionale,

che non deve tradursi, per ignoranza del progettista, nell' impoverimento e nella perdita di importanza, sia tecnica che culturale, del bene di produzione. Il problema che si pone è, allora, "come realizzare e incentivare i canali di trasmissione della cultura dei nuovi materiali da un settore produttivo all'altro, in modo da fondare una cultura e una prassi pluridisciplinari" (Mangiarotti, 1991, p. 73), pur sapendo, come avverte Giuseppe Ciribini (1992) che è molto difficile gestire un processo che deve coinvolgere le informazioni e le conoscenze derivanti da discipline scientifiche e del sapere umanistico ancora molto incomunicanti. L'approccio ai materiali comporta, quindi, per il progettista la conoscenza di un linguaggio per comunicare con i campi della scienza dei materiali, ai quali deve saper correttamente rivolgere le domande relative all'aspetto comportamentale, tecnologico e produttivo dei nuovi materiali: in questo senso "occorre osservare come il progettista, più di ogni altra figura diventa la 'chiave di accesso' al sapere tecnico. È il progettista che, una volta delineati i termini del problema, deve sapere dove reperire le competenze in grado di proporre le soluzioni adeguate" (Campioli, 1993, p.78).

Note di approfondimento

1. Il termine *tecniche esecutive* è qui riferito al campo specifico delle costruzioni. Per una corretta comprensione della logica interna e del significato delle tecniche esecutive non è possibile, però, considerarle solo nel loro ristretto ambito di applicazione ma è necessario metterle in 'relazione a': quella di metterle in relazione al più vasto problema della tecnica è, insieme alla relazione con forma e funzione, una delle strade possibili da seguire (Nardi, 1986). Il concetto di tecnica riguarda "qualsiasi forma di attività umana volta, sfruttando le conoscenze della scienza, alla creazione di nuovi prodotti e strumenti che migliorino le condizioni di vita dell'uomo" (Cortellazzo, Zolli, 1988, p. 1320). Bisogna fare attenzione a non identificare la tecnica con gli oggetti tecnologici prodotti, bensì considerarla come "un qualcosa d'intermedio tra la teoria e la prassi" (Calogero, 1937, p. 378), un mezzo o un percorso per arrivare a un fine: quindi la tecnica come strumento di mediazione vista, nell'ottica di un rapporto dialettico tra fenomeni tecnici e fenomeni socio-culturali, come manifestazione e, al tempo stesso, interpretazione culturale, quindi appartenente al dominio della cultura materiale (Bucaille, Pesez, 1978). Ma l'essenza della tecnica non si esaurisce nel ruolo di mediazione: la tecnica, nell'analisi heideggeriana, non è "semplicemente un mezzo ma anche un modo del disvelamento" (Nardi, 1986, p. 31), un *fare avvenire* ciò che è nascosto, più semplicemente un offrirci nuove esperienze, un *mettere allo scoperto* (13). Identificare la tecnica con le precedenti affermazioni le assegna un ruolo importante nell'evoluzione della cultura (Bertoldini, 1991, p. 19) e spiega l'importanza della riscoperta e dello studio delle tecniche esecutive delle costruzioni come legame tra costruito e cultura collettiva, e del ruolo di tramite, di interprete della cultura di una società, che ricopre il progettista.
2. "Il termine *materiale* ha significati che si riferiscono alla 'madre terra', alle origini divine e al primo materiale da costruzione (e significa ciò che è stato creato, che discende dalla genesi). L'aggettivo materialis, -e (lat.), materiale, formato di materia, deriva da mater, matris (lat.), dal greco méter, dal dorico mater e dall'indioeuropeo matros. Meter significa la gran madre degli dei Rea, Cibele, talora De-meter, madre terra. Il sostantivo materia, -ae (lat.) si riferisce al legname come primo materiale da costruzione. In italiano il termine materiale significa tutto ciò che serve per costruire edifici, opere stradali, ponti, ecc; tra quelli che hanno una diretta funzione statica si distinguono i materiali 'naturali' (come sabbia, sassi, legno, metalli), i materiali 'artificiali' (come laterizi, calce, cemento). Sono detti materiali 'accessori' quelli che si impiegano nelle opere di finitura (come vetro, asfalti, materie plastiche), materiali 'nobili' quelli di particolare valore" (Nardi, 1996). Una delle accezioni più diffuse del termine materiale è quella che lo identifica con il concetto di 'materia prima'. "Materie prime, in generale, sono tutte quelle componenti dell'ambiente naturale atte a soddisfare i bisogni dell'uomo" (Wyrobisz, 1979, p.930). In questo senso due distinzioni sono comunque essenziali: quella fra materie prime naturali e industriali (sintetiche) e quella delle materie prime naturali in minerali (come carbone, petrolio, metano, metalli comuni e metalli nobili, minerali non metallici) e organiche (come legno, grano, pellami, lana, cotone).
3. Il riferimento all'*insieme di atti tecnici* è dovuto alla convinzione che "il progetto si elabora attraverso una serie di atti mentali che si inverano nella costruzione attraverso una serie di atti tecnici" (Nardi, 1991, pp. 26-27). Tale considerazione porta a riflettere sul rapporto tra fenomeni tecnici e fenomeni culturali, non tanto nel senso dell'influenza delle tecniche sulla vita quotidiana, ma nel senso della ricerca dell'articolazione dialettica fra produzione e struttura sociale. Robert Cresswell (1981, p. 978) introduce il concetto di "studio degli insiemi di atti tecnici", affermando che le tecniche costituiscono delle strutture, insiemi di elementi, gli atti tecnici, che presentano i caratteri di un sistema dove la trasformazione di un elemento si riflette sugli altri. Questi insiemi di atti tecnici diventano, nel momento in cui il progettista si rivela capace di interpretare il contesto nel quale è chiamato ad agire, "atti culturali complessivi" (Nardi, 1991, p. 14), cioè espressioni della cultura di una società.
4. Il concetto di *cultura* riguarda il "complesso di cognizioni, tradizioni, procedimenti tecnici e similari, trasmessi e usati sistematicamente, caratteristico d'un gruppo sociale, d'un popolo o dell'intera umanità" (Cortellazzo, Zolli, 1988, p. 305). Il concetto di cultura è legato alla capacità di cogliere dalle esperienze del passato ciò che può far meglio operare nel presente: suo carattere peculiare è, quindi, quello di "essere il risultato di una sedimentazione di esperienze personali o di gruppi ristretti per diventare poi patrimonio collettivo" (Nardi, 1988, p. 134). Ma cultura significa anche comunicazione; essa è provvista di un linguaggio che si esprime con le attività umane, con la lingua e la parola, con i segni e i simboli, con le azioni tecniche (Leach, 1978, pp. 255-261). Queste ultime, le azioni tecniche intese come momento culturale, ci

introducono alla nozione di cultura materiale alla quale si riconduce l'insieme dei materiali, dei fenomeni infrastrutturali e degli oggetti concreti, che sono patrimonio diffuso, dunque ripetitivo e non eccezionale, riferibile alla massa della popolazione, quindi, collettivo e non individuale (Bucaille, Pesez, 1978). La cultura materiale è, dunque, un campo d'indagine sulle tecniche, sui materiali, sui modi di vita, sul contesto culturale, storico e sociale riguardante la produzione di una data società, non finalizzato a una classificazione storico-archelogica, ne riferito solamente alla semplice materialità, ma teso ad acquisire la consapevolezza e la motivazione di molti atti tecnici che sottendono le costruzioni, nella ricerca del radicamento storico e ambientale del progetto architettonico: dato che qualsiasi costruzione appartiene alla cultura dell'uomo, esiste l'esigenza, per ogni insieme di atti tecnici, di trovare continuamente un riferimento, un legame, con la cultura e la società a cui appartengono, quel legame che permette all'architettura diffusa di essere espressione, riconoscibile e condivisibile, della sintesi tra il fine e i mezzi (Nardi, 1986).
5. Con il termine *attori* del processo progettuale, più che la suddivisione, riferita al processo di costruzione, tra committente, gruppo di progettazione e di direzione lavori, impresa di costruzioni, industria fornitrice e organismi di controllo (Campioli, 1993, pp. 42-45), si vogliono intendere tutti i soggetti interessati da conoscenze specialistiche, tecnici, ricercatori, operatori, che è possibile individuare nelle imprese artigiane, nel mondo industriale, nei centri di ricerca e sviluppo, nelle università.
6. Il termine *contesto* è specificato da Andrea Campioli (1993) come l'insieme di circostanze o situazioni condizionanti, siano esse di ordine spaziale, oggettuale o temporale, che costituiscono le condizioni al contorno del costruire contemporaneo. In tal senso la realtà tecnica è oggi caratterizzata da fenomeni quali: il trasferimento tecnologico di tecniche e materiali sviluppati in campi o industrie particolari; l'ibridazione delle tecniche esecutive, che affianca materiali tradizionali a tecnologie evolute; l'assemblaggio a secco, condizione essenziale per garantire flessibilità progettuale e costruttiva; la flessibilità produttiva, che permette di ottenere componenti su misura anche a livello industriale; l'ampliamento, verso ambiti internazionali, del mercato tradizionalmente interessato dal processo edilizio.
7. I *livelli di complessità* legati al settore delle costruzioni contemporaneo sono, secondo Andrea Campioli (1994), tre: un livello tecnologico, rappresentato sia dalla compresenza di diversi materiali e di diverse tecniche di assemblaggio molto differenti tra loro, sia dalla sempre crescente dotazione impiantistica all'interno delle strutture edilizie che rende necessarie tecniche di controllo e gestione molto sofisticate; un livello funzionale-tipologico, rappresentato dall'elevato grado di flessibilità che deve caratterizzare gli edifici nel tempo; infine, un livello progettuale-costruttivo, che vede la sovrapposizione temporale di fasi un tempo distinte nel processo edilizio, fenomeno determinato da un lato dall'esigenza di limitare gli investimenti improduttivi, dall'altro lato dal dilatarsi dei tempi di progettazione di subsistemi sempre più sofisticati.
8. L'aggettivo *informazionale* è riferito da Ezio Manzini alla complessità e profondità nella manipolazione sui materiali da parte dell'uomo. La fase attuale nell'utilizzo della materia può essere definita come "quella dei materiali a 'complessità gestita'. [...] In questa gestione della complessità la capacità progettuale e di manipolazione si spinge assai più in profondità nella struttura della materia: dall'ingegneria molecolare alla produzione di particolari cristalli, fino ai procedimenti di 'drogaggio', lo spessore del'artificiale cresce, va più in profondità, lascia la superficie. [...] Nasce da questo panorama una generazione di oggetti più densi, fatti di materiale ad alta informazione o, in altri termini, a più alta intensità prestazionale" (Manzini, 1986, p.30-39).
9. Circa la *crisi del processo di apprendimento tradizionale* del progettista, Guido Nardi osserva come "l'ampliamento delle possibilità tecniche, invece di essere colto nella sua dimensione propositiva, è stato recepito come possibilità di trascurare la realizzabilità del progettato, considerando la tecnica contemporanea in grado di risolvere a posteriori qualsiasi richiesta del progettista. Ne è seguito un disinteresse per la sfera tecnica che non ha tardato a tramutarsi in vera e propria ignoranza tecnica, con tutte le conseguenze che già oggi possiamo riconoscere in termini di scarsa qualità del costruito e di degrado ambientale diffuso" (Nardi, 1993, p.10).
10. Il *progetto innovativo* è in questo senso definito in termini "di attività di definizione della matrice di possibili esecutivi" (Campioli, 1993, p. 33). Il termine *matrice* vuole indicare "ciò che costituisce l'origine, la causa fondamentale o più propriamente l'elemento ispiratore del fenomeno. La locuzione possibili esecutivi indica le diverse soluzioni tecnicamente realizzabili, attraverso l'impiego di materiali e tecniche esecutive differenti o associate in modo differente, per rispondere a un determinato problema" (ivi; p. 36, nota 4).

11. Il concetto di *materia* riveste particolare importanza nel pensiero scientifico e filosofico: ciò "è dimostrato dal fatto che la filosofia occidentale nasce circa venticinque secoli fa con le speculazioni dei filosofi ionici sulla natura della materia" (Gratton, 1979, p.878). Nel pensiero ionico del VII e V secolo, l'esigenza di scoprire un'unità nella diversità delle cose suggerisce ai primi filosofi di identificare la 'materia primaria' con l'acqua (Talete), con l'aria (Anassimene), o con il fuoco (Eraclito), mentre in Anassimandro rimane una sostanza non identificabile con quelle conosciute, l'indeterminato (Mangiarotti, 1989, pp. 10-11). Da allora il concetto di materia ha subito profonde variazioni (infinite definizioni nelle infinite discipline in cui è coinvolto), a seconda fosse collegato a termini quali 'forma', 'spirito', 'energia', 'numero', mantenendo comunque una certa costanza di significato nell'indicazione dell'elemento stabile, solido, permanente della realtà. Dal punto di vista della fisica classica e macroscopica, la materia viene definita come tutto ciò che è dotato di massa e di inerzia, classificabile secondo gli stati di aggregazione (solido, liquido, gassoso). Dalla metà circa del secolo scorso, nella definizione di materia è stato necessario introdurre "concetti fisici nuovi come quelli di energia e di campo, di causalità, ecc. e quindi seguire un numero sempre maggiore di sviluppi paralleli. Nello stesso tempo, il concetto di materia si è fatto sempre meno definito; all'ultimo è divenuto sempre più difficile parlare di 'materia' e sotto molti aspetti questo termine è stato sostituito dal termine 'particella', ma forse sarebbe più opportuno usare un termine ancora più vago come 'entita' [...]" (Gratton, 1979, p.927).
12. Il concetto di *materiale* è accomunato da Andrzej Wyrobisz a quello di materia prima: "il concetto di materie prime è dunque di carattere socioeconomico e, di conseguenza, storico. Risorse, assortimento, sfruttamento e generi delle materie prime dipendono sia dal grado di sviluppo tecnico raggiunto sia dai rapporti sociali (politici e culturali, oltre che economici) e mutano nella misura in cui anche quei rapporti si trasformano. Il concetto di materie prime presuppone che si tratti di beni materiali per procurarsi i quali è stata investita una certa quantità di lavoro umano e non quindi di risorse fornite già pronte dalla natura. [...] Qualcosa, dunque, di assai diverso da un puro computo bruto di quantità giacenti in un certo territorio, ma una complessa relazione tra cultura di un certo gruppo e modo di intendere le risorse naturali o artificiali. Uno stesso materiale può essere e non essere materia prima e ciò viene a dipendere dall'economia, dalla religione, dalla tecnica, dall'idea del futuro come anche dalla magia. Storia in senso generale, come sviluppo in senso più specifico entrano dunque nella determinazione della scelta di alcuni tipi di oggetto come materiali; il loro divenire strumento, manufatto, utensile non va visto in una ipotetica linea di evoluzione tecnologica ma piuttosto all'interno di un complesso sistema o struttura in cui vanno considerati molti dati, molte combinazioni che attengono da un lato a ciò che esiste in natura come puro materiale, dall'altro all'insieme della conoscenza e dei valori di quel dato gruppo umano, posto in certo tempo e in certo spazio" (Wyrobisz, 1979, p. 930, pp. 959-960).
13. Riguardo al concetto di *materiale su misura*, secondo Ezio Manzini (1986) è proprio con l'introduzione delle materie plastiche, entrate in competizione con i materiali preesistenti, che questo fenomeno ha subito un cambio di velocità, una accelerazione: l'evoluzione nei materiali abbandona i tempi relativamente lunghi dell'esperienza pratica, e viene integrata dalla scienza e dalla tecnologia dei materiali. Ciò ha determinato la moltiplicazione del numero di materiali disponibili e delle loro possibili combinazioni, creando un continuum di possibilità, sulle quali di volta in volta progettare il materiale con le proprietà richieste. A questo proposito, è interessante sottolineare come uno tra i progettisti più attenti all'innovazione nel campo dei materiali, Dominique Perrault, consideri il vetro, a differenza del metallo, "un materiale molto flessibile, nel senso che su di esso è possibile intervenire nei modi più disparati, per esempio dal punto di vista produttivo. Non appena si comincia a fare ricerca sul vetro, si scopre che lo si può far variare, [...] un materiale altamente tecnologico, [...]" (Perrault, 1993, pp. 134-135).
14. La relazione tra *cultura e materiale* investe non solo la fase di 'appropriazione' della materia da parte dell'uomo, ma anche i successivi utilizzi del materiale così ottenuto. Secondo Dino Formaggio: "Oltre che sul piano naturale ed esistenziale e sul piano strutturale, il materiale agisce nella tecnica artistica anche come fatto culturale. I materiali hanno una storia, emergono nelle lavorazioni, vengono di moda, tramontano, mentre altri ne emergono e caratterizzano epoche di civiltà, stili di cultura. Vi è una cultura del mattone come v'è ne una del ferro o del cemento armato. Vi sono civiltà del legno e delle ceramiche e altre delle materie plastiche. E ciascuna materia se viene vissuta soggettivamente in una certa polarizzazione psicologica individuale fa anche parte di un vissuto collettivo e instaura per il tempo in cui sale dominante culturale, tutto un suo orizzonte di gusto o di stile" (Formaggio, 1981, p.127). Inoltre, Martin Heidegger afferma che esiste una materialità dell'opera identificando opera con 'cosa': "tutte le

opere hanno questo carattere di cosa [...], il carattere di cosa è talmente radicato nell'opera d'arte che noi diciamo: l'edificio è in pietra, la scultura lignea è in legno" (Heidegger, 1950). La 'cosità' dell'opera d'arte, e, quindi, anche dell'architettura, è allora disciplinata dalla scienza, che appartiene alla sfera culturale, e dalla tecnologia dei materiali, che "disciplina l'amministrazione 'libera' della materia che 'appartiene' al progettista" (Celaschi, 1995, p.14).
15. In riferimento alla *conoscenza specifica*, Martin Pawley (1987) sostiene che la perdita da parte degli architetti della capacità di controllare la tecnologia rischia di ridurre il loro lavoro a semplice styling e che solo rendendosi capaci di trasferire le tecnologie avanzate dagli altri settori industriali all'architettura, gli architetti potranno recuperare l'iniziativa perduta**.**
16. Il concetto di *poetica* si riferisce al programma, al manifesto operativo, che ogni singolo progettista pone a fondamento della propria attività progettuale, *ante rem*, e che si struttura sull'insieme delle sue conoscenze integrate, quindi non solo riferite all'esclusiva pertinenza tecnica, ma estese a tutti i campi del sapere che formano la cultura (Bertoldini, 1991): è quindi quel "sistema di riferimento culturale e tecnico secondo cui gli atti tecnici vengono organizzati in un progetto [...] che contenga e sviluppi tutti gli elementi costitutivi e caratterizzanti una cultura costruttiva consolidata" (Campioli, 1991, p. 31-32). La definizione di poetica sottende un atteggiamento culturale del progettista conscio della necessità di una paziente e continua ricerca, di una costante elaborazione e sperimentazione, di un confronto con la realtà tecnica e culturale nella quale è immerso il progetto, necessità che sta alla base dell'innovazione tecnica; un atteggiamento che, per contro, rifiuta l'espressione artistica come manifestazione del "genio progettante" (ivi; p. 49). La poetica può, quindi, essere precisata come il complesso organico di conoscenze culturali, non solo strumentali, della tecnologia e delle tecniche esecutive (Nardi, 1988, p. 140), apparato teorico non fine a se stesso, ma funzionale alla pratica; il bagaglio formativo, *ante rem*, di ogni progettista che, consapevole di agire in un contesto ben definito, voglia essere, attraverso l'uso corretto dei mezzi a disposizione, "interprete culturale del proprio tempo" (ivi; p. 133). Intesa come programma operativo, la poetica acquisisce valore solo è riconoscibile in tutte le fasi del progetto, dall'ideazione fino alla costruzione vera e propria; deve quindi caratterizzarsi come processo euristico dove esista già nella fase ideativa un riferimento agli aspetti tecnici della pratica costruttiva: solo in questo modo essa acquista valenza di "luogo privilegiato della legittimazione culturale del progetto" (Campioli, 1991, p. 41).
17. La *cultura tecnologica* del progettista, se, in sintesi, consideriamo la cultura come insieme di conoscenze, la tecnologia come espressione globale di una cultura spirituale e materiale, e la progettazione come attività poetica tesa alla sintesi tra fini e mezzi, diventa un luogo dell'analisi delle condizioni di legittimità dell'architettura, cioè dell'utilizzo coerente con gli scopi prefissati della tecnologia, del rispetto degli schemi culturali e dell'esigenze funzionali e simboliche dei fruitori, e dell'adeguatezza delle modalità interne al processo progettuale con tutto questo. Questo porta a considerare "la capacità del progettista di interpretare culturalmente la realtà contemporanea", [...] e l'atto tecnico non come un elemento a sé stante, bensì come un atto globale capace di riassumere la cultura di cui è espressione" (Nardi, 1991, p. 13 e p. 19). Se l'architettura deve essere attualità assoluta di fini e mezzi, allora la cultura tecnologica deve manifestarsi, in una costruzione, come sintesi tra espressione formale, strumenti che ne consentono la realizzazione e esigenze della collettività, attraverso la poetica del progettista che gli è sottesa. Il fine della cultura tecnologica della progettazione è allora quello di contribuire a conoscere e a riappropriarsi culturalmente delle tecniche esecutive e dei materiali, studiando la relazione tra ciò che si usa per costruire e l'architettura.
18. Il confronto tra *progetto e teoria etica* va inteso, secondo Andrea Campioli (1993), come riscoperta del limite, della finalità che, nella cultura materiale agricola-artigianale, ha sempre legato la realizzazione di un oggetto al suo uso. "La tecnologia contemporanea rende possibile costruire qualsiasi cosa, qualsiasi cosa venga pensata trova, prima o poi, una soluzione tecnica adeguata. Ed è a questa possibilità infinita che bisogna porre un limite" (Campioli, 1993, p. 25).
19. Il *naturale* e l'*artificiale* sono sempre stati visti dalla cultura occidentale "come i due termini antitetici di una dicotomia fondata sull'assunto che nel mondo si abbia a che fare con due diversi ordini di cose. [...] Uno di essi si suppone essere il risultato delle forze cieche della natura e indipendente dall'attività umana. L'altro invece è il frutto cosciente di tale attività. [...] Non può essere (certamente) accettata l'ansia ecologista che propone una netta divisione tra naturale e artificiale. Una divisione che viene poi acuita dall'attribuzione al primo di un carattere positivo mentre al secondo di un carattere negativo" (Campioli, 1993, p. 22).
20. La posizione del *Movimento Moderno* sui materiali è ben chiarita da Frank Lloyd Wright (1957, tr. it. 1963) quando afferma che "il legno e l'intonaco si accontenteranno di essere legno e intonaco, non aspireranno a essere trattati in modo da assomigliare al marmo. Né gli edifici in

cemento armato vorranno sembrare in marmo o in lastre di pietra viva. Ciascuno avrà una propria grammatica, verace rispetto al materiale [...]".
21. In merito alle *innovazioni* che l'introduzione delle materie plastiche ha comportato in campo architettonico, si possono citare i materiali compositi, le tensostrutture, i giunti di accoppiamento, i pannelli di tamponamento, i termo e vibro-isolanti, le coperture trasparenti, le additivazioni nel calcestruzzo. A queste è probabile che molte altre se ne potranno aggiungere con l'evoluzione dei tecnopolimeri, che affiancano alle tradizionali doti di leggerezza e formabilità quelle di resistenza meccanica e termica.
22. In riferimento alla *mimesi* e al carattere positivo che tale processo può avere nella fase d'introduzione di una nuova tecnica o di un nuovo materiale, in quanto rende più morbida e accettabile culturalmente alla collettività tale innovazione, Andrea Campioli afferma che "altrettanto non si può dire delle molte applicazioni che vedono oggi la plastica travestita da radica, legno o pelle. Oggi infatti l'uso della plastica più che fare affidamento al contesto culturale dei materiali naturali dovrebbe esprimere una maturità culturale autonoma, frutto di ormai oltre cinquanta anni di sperimentazioni e di applicazioni" (Campioli, 1991, p. 24)
23. La definizione di *tecnologia* come studio delle tecniche e dei materiali viene superata, nell'ottica di un radicamento culturale della tecnica unito al concetto di 'insiemi di atti tecnici', di 'relazione tra' (confronta nota 1.), e viene inquadrata dal punto di vista di un uso consapevole e integrato dei materiali e delle tecniche esecutive (Nardi, 1991, p. 51), cioè conscio delle implicazioni che ogni scelta tecnica ha nei modi di vita e nel rapporto tra uomo e ambiente. La tecnologia diventa quindi momento cardine della mediazione tra progetto ed esigenze dell'uomo, continua riflessione sull'opportunità delle scelte tecniche, studio della lenta e continua sperimentazione che caratterizza la produzione culturale di un determinato gruppo sociale. Boaga definisce la tecnologia ",nel contesto delle attività umane, quel complesso strutturale che, pur senza ignorare il peso dei problemi dei materiali e dei relativi procedimenti di trasformazione, li trascende per affrontare il cardine dei rapporti tra le metodologie di produzione e di progettazione e le esigenze del'uomo" (Boaga, 1975, in Truppi, 1994, p. 189). Per Giuseppe Longo (1995) la tecnologia fa parte della cultura, intesa come 'insieme delle interazioni tra uomini e società', e il corpo è il primo strumento tecnologico usato dall'uomo, intendendo così la tecnologia come una sorta di prolungamento del corpo stesso. Attraverso la tecnologia noi costruiamo 'filtri potenti' per osservare il mondo, ma, soprattutto, costruiamo un nostro modo di vedere le cose, un modo che, quindi, è soggettivo, non oggettivo: la tecnologia è importante perché, in ultima analisi, modifica l'uomo e la conoscenza è il momento centrale dell'agire tecnico, in quanto "chi conosce agisce e chi agisce non può non conoscere" (ivi; 1995). Quest'ultima affermazione è, a mio parere, la conferma della fondamentale importanza del radicamento culturale del attività progettuale.
24. In riferimento alla *conoscenza dei materiali e delle tecniche esecutive* Theodor W. Adorno (1965, tr. it. 1979, p. 114-115) afferma che "solo l'incompetenza dilettantesca e l'idealismo banausico avranno difficoltà ad ammettere che ogni autentica attività artistica nel senso più alto del termine esige una conoscenza dei materiali e delle tecniche disponibili estremamente esatta [...]. Chi non impara a conoscere ciò che è disponibile e non gli fa compiere un passo avanti, estrae dal proprio presunto abisso di profondità soltanto il residuo di formule ormai superate". Eugène Emmanuel Viollet-le-Duc (1863) dice che bisogna impadronirsi "francamente dei mezzi forniti dal nostro tempo [...]. Se il ferro è destinato a prendere un posto importante nelle nostre costruzioni, studiamo le sue proprietà, [...] la vera funzione propria di questo materiale".

II. OBIETTIVI

La questione dei materiali, nel complesso contesto costruttivo contemporaneo, costituisce un terreno d'indagine particolarmente interessante per l'eterogeneità degli ambiti disciplinari che attraversa, e per la ricchezza di relazioni che tale indagine può coinvolgere. Senza volerne qui analizzare le cause culturali, sociali e simboliche, è doveroso sottolineare come, rispetto ad altre aree produttive, lo studio dei materiali investa con notevole inerzia il settore delle costruzioni (1): a fronte di tale inerzia, una delle possibili spinte all'approfondimento su questo tema può essere quella legata alle esigenze ambientali sia pre-costruttive (uso di materiali riciclati), sia post-costruttive (riciclabilità dei rifiuti da demolizione). Ma se questa può essere la ragione, lo stimolo iniziale che, tra l'altro, giustifica l'approccio al problema oggetto di questa tesi, nel caso delle materie plastiche non deve diventare l'obiettivo principale: occorre, cioè, superare il mito del riciclo, probabile retaggio dell'ansia ecologista dell'ultimi decenni, e con esso la visione puramente quantitativa del problema (2); a questa visione, conseguenza di una sovradimensionata fiducia nelle possibilità di smaltimento dei rifiuti plastici, anche nel settore delle costruzioni, è corrisposta in questi anni una mortificante realtà in cui l'utilizzo di materiali plastici riciclati (3) appare vincolato a sussidi governativi o a illuminate volontà sperimentali di committenti e progettisti. È, invece, necessario spostare l'attenzione sul terreno qualitativo e prestazionale, considerando le materie plastiche riciclate come materie prime a tutti gli effetti, materiali che, pur non disponendo delle qualità chimico, fisiche e meccaniche adatte per il loro reimpiego nei prodotti per i quali sono stati studiati, mantengono intatto, per le esigenze del settore delle costruzioni, un livello prestazionale ancora elevato: nel rapporto tra architettura e materie plastiche riciclate, bisogna cominciare dal ragionare in termini di prestazioni, di lavorabilità, di leggerezza, di flessibilità, di assemblabilità, di manutenibilità, di rapidità. In sintesi significa partire, eticamente, dai bisogni, dalle esigenze tecniche e culturali dell'architettura più che dalle finalità del riciclo: forse così è possibile ottenere quei risultati che, aiutando a creare la cultura materiale legata all'uso delle materie plastiche nelle costruzioni, contribuiscano anche al loro riciclo. In questo senso, per costituire una cultura materiale in questo campo, il primo passo è rappresentato dal tentativo, difficile, di formare un linguaggio comune tra diversi saperi che permetta a specialisti e progettisti di

dialogare e lavorare sinergicamente sul rapporto tra scelta dei materiali e progetto, tentativo che si vuole concretizzare con l'obiettivo della realizzazione di una guida tecnica, uno studio sulle possibilità operative e applicative relative ai materiali polimerici di riciclo nel settore edilizio. Questo studio può essere suddiviso in tre filoni tematici: il primo filone comprende le scienze di base (la chimica e la fisica) e la scienza dei materiali, cioè la definizione delle caratteristiche chimiche, fisiche e meccaniche dei materiali polimerici vergini e del livello di degradazione di quelli riciclati, definizioni per affrontare la progettazione del materiale; il secondo filone riguarda la tecnologia dei materiali, cioè l'insieme delle possibilità tecniche relative alla produzione e alla applicazione delle materie plastiche, vergini e riciclate, nel settore delle costruzioni e non, in quanto il bagaglio di informazioni, che sottende ogni innovazione, cresce nel substrato di applicazioni specifiche, e magari secondarie, che caratterizzano l'utilizzo di un materiale; il terzo filone riguarda il disegno industriale, cioè i principi guida generali per la progettazione di manufatti con i materiali polimerici, parametri che riguardano aspetti dimensionali, sollecitazioni, caratteristiche funzionali del prodotto. Quindi, per le finalità poste, questa tesi si struttura secondo un approccio metaprogettuale, intentendo la metaprogettazione come quella fase che raccoglie e correla il materiale informazionale e lo traduce in un preciso quadro di riferimento: in tal senso va inquadrata la definizione, sulla base delle conoscenze acquisite, di componenti ed elementi costruttivi in materiali polimerici di riciclo, definizione che conclude questa tesi.
Una tesi che passa attraverso il tentativo di restituire un quadro aggiornato sullo stato dell'arte sul riciclo di materiali plastici, quadro che coinvolge le associazioni e i consorzi a livello nazionale e internazionale, le multinazionali produttici di polimeri vergini, le aziende impegnate attivamente nella trasformazione di materiali riciclati, i centri di ricerca e sviluppo: si tratta di soggetti che, per motivi statutari, per ragioni di marketing o di produzione, si trovano impegnati nel chiarimento delle problematiche legate a questo tema.

Note di approfondimento

1. In merito al *rapporto cultura-architettura*, rapporto che lega, nel mondo del costruito, l'uso di tecniche esecutive e materiali anche a simbologie dell'inconscio collettivo, e che può essere addotto come motivo per cui certe tecniche e certi materiali persistono a lungo nel tempo, o si modificano molto lentamente, o, più in generale, sul rapporto tra la cultura materiale, le tecniche esecutive e i materiali da costruzione si possono citare i seguenti interventi: Guido Nardi, *Le nuove radici antiche*, Angeli, Milano, 1994[6]; Guido Nardi, *Genius artis e genius materialis*, in *La casa tra tecniche e sogno*, a cura di Marisa Bertoldini, Angeli, Milano, 1988; Guido Nardi, Andrea Campioli, Anna Mangiarotti, *Frammenti di coscienza tecnica*, Angeli, Milano, 1991; Marisa Bertoldini e Monica Zappelli, a cura di, *Atti Tecnici e cultura materiale*, CittàStudi, Milano, 1992; Marisa Bertoldini, *La cultura del progetto*, in *Seminari di Cultura Tecnologica della Progettazione*, a cura di Monica Zappelli, CittàStudi, Milano, 1993.
2. Nell'Europa Occidentale, la *percentuale di materie plastiche*, rispetto al totale dei rifiuti solidi urbani è molto bassa, pari al 7% (CIBA, 1992, p. 4), anche se visivamente può apparire maggiore a causa del voluminosità di tali rifiuti. Tale percentuale corrisponde anche alla nostra media nazionale, ma in città come Milano, a causa degli elevati livelli di vita, di reddito e di consumi, la percentuale sale fino al 13.5 % (Brambilla, Gargantini, 1992). Per avere un idea dell'eccessivo, e forse non del tutto imparziale, entusiasmo che ha circondato il problema del riciclo delle materie plastiche, giungono alcune conclusioni di un recente congresso sui rifiuti plastici (AA.VV., 1995[2], pp. 4-6): è stato documentato come, riciclando il 50 % di tutti i contenitori in plastica contenuti nei rifiuti solidi urbani, il decremento nelle quantità di rifiuti portate in discarica sarebbe inferiore all'1 %, e come l'imposizione del limite di velocità a 100 Kmh sulle autostrade tedesche permetterebbe di risparmiare più petrolio di quanto usato per produrre tutti gli imballaggi in plastica usati nel paese!
3. La *materia plastica di riciclo* è stata definita dalla Sottocommissione SC 25 dell'Uniplast denominata "Materiali da riciclo", (l'Uniplast è l'ente federato all'UNI con lo specifico compito di preparare i testi delle norme sulle materie plastiche), all'interno del progetto di norma 602, "un materiale che proviene da post consumo o da residui industriali, che è già stato sottoposto a un processo (polveri, scaglie, granuli) in modo che possa essere destinato a una ulteriore trasformazione o alla fabbricazione di un semilavorato o di un prodotto finito. [...] Non sono quindi presi in considerazione i materiali provenienti da un processo industriale che vengano riciclati all'interno del processo stesso (sfridi di lavorazione, mattarozze, ecc.): sono invece presi in considerazione i materiali provenienti da residui industriali derivanti dai processi di produzione e trasformazione dei polimeri, e i materiali da post consumo di origine industriale, agricola commerciale, e dalla raccolta differenziata e selezione dei rifiuti solidi urbani" (Callegaro, 1995).

Capitolo 1
ARCHITETTURA E RICICLO: LE CONDIZIONI AL CONTORNO

In questo capitolo si prendono in esame alcune condizioni al contorno rispetto all'utilizzo delle materie plastiche riciclate nel settore delle costruzioni. Da un punto di vista concettuale questa trattazione si svolge sul tema della "costruzione sostenibile" (Par. 1.1), che si riferisce alla scarsità delle risorse a disposizione e, più in generale, ai limiti che la società industriale ha evidenziato negli ultimi decenni (1): in questo senso occorre che nel mondo delle costruzioni si inserisca tra i criteri valutativi, oltre alle variabili costi-tempi-funzione, anche la variabile ambientale (Par. 1.1.1).
Il concetto di "costruzione sostenibile" introduce l'esigenza di un progetto architettonico orientato al riciclo come strategia per far fronte alla crescente quantità di rifiuti edilizi (Par. 1.1.2), esigenza che può portare il progettista a utilizzare materiali anche diversi da quelli tradizionali: ciò porta a riflettere, nell'ambito delle costruzioni, sulle condizioni di possibilità che caratterizzano la relazione tra architettura e riciclo (Par. 1.2). Tali condizioni possono riferirsi al percorso delle innovazioni e alle condizioni necessarie affinché si realizzi la sostituzione dei materiali (Par. 1.2.1) e, in particolare, si radicano nel panorama storico delle esperienze di riciclo nella storia delle costruzioni (Par. 1.2.2) e si collegano al problema del recupero e dello smaltimento dei residui da costruzione e da demolizione (Par. 1.2.3). Nel quadro della "sostenibilità" e del rapporto tra riciclo e costruito si inserisce, in maniera trasversale, l'evoluzione legislativa (Par. 1.3), che coinvolge il problema dei rifiuti (Par. 1.3.1), la normazione sui materiali plastici riciclati (Par. 1.3.2) e quella sui prodotti da costruzione (Par. 1.3.3): in questo senso l'intervento legislativo assume fondamentale importanza nell'equilibrio fra interessi intersettoriali diversi, fra questi ultimi ed esigenze sociali, come strumento principale di incentivazione, pianificazione e programmazione delle attività di ricerca,

sperimentazione e diffusione riferite al riciclo, nonché quale strumento di definizione puntuale dei campi di applicazione dei materiali riciclati.

1.1 La questione della "costruzione sostenibile"

Il concetto di sostenibilità, il rapporto Burtland, i principi della costruzione sostenibile, il paradigma della sostenibilità, la qualità ambientale, l'eco-bilancio, l'eco-efficienza, la responsabilità estesa al produttore, la classificazione delle tecniche, il riciclo come requisito dell'attività costruttiva, il ruolo del progettista - I nuovi paradigmi della progettazione, le tecniche di assemblaggio a secco, la manutenzione programmata, la flessibilità funzionale, la disassemblabilità, l'innovazione tecnologica.

Nel più ampio dibattito sulle tematiche ambientaliste che, a partire dalla seconda metà del nostro secolo, ha investito diversi campi del sapere, scientifico, antropologico e filosofico (2), la questione della "costruzione sostenibile" ha assunto nell'ultimo decennio una sua valenza specifica. Il concetto di "sostenibilità" (3) si riferisce alla necessaria considerazione di ridurre al minimo gli impatti sull'ambiente, potenzialmente negativi, legati all'attività umana tesa a soddisfare i propri bisogni (IUCN, 1980): il Rapporto Brundtland (4), invece, descrive la "sostenibilità" come la necessità di lasciare alle generazioni future risorse sufficienti affinché esse possano godere di una qualità di vita simile alla nostra. Di fatto, la "sostenibilità" si fonda su tre criteri principali:

- la riduzione del consumo di risorse;
- la prevenzione del degrado ambientale;
- il miglioramento della salubrità ambientale.

Da un punto di vista analitico, quindi, il termine "sostenibilità" appare più attuale e pertinente rispetto al termine "ecologia" che, all'interno del dibattito ambientalista, è stato strumentalizzato da atteggiamenti fortemente sentimentali e pessimistici che hanno impedito una reale comprensione del problema ambientale (spesso nella ricerca di soluzioni taumaturgiche alla sempre più "grave" emergenza ecologica): si tratta, invece, di porre le basi, in maniera propositiva (5), per un lungo e difficoltoso processo di educazione a comportamenti lungimiranti, consci della limitatezza delle risorse del nostro pianeta.
In questo processo è coinvolta anche l'attività del costruire che incide sulla trasformazione e modificazione dell'ambiente naturale, sia perché interviene direttamente sugli aspetti morfologici del territorio, attraverso l'edificazione e il prelievo di materie prime, sia

perché indirettamente contribuisce al peggioramento della salubrità ambientale, attraverso l'aumento della produzione di anidride carbonica legata agli insediamenti abitativi e l'emissione di sostanze dannose contenute nei materiali utilizzati.
La questione della "costruzione sostenibile" rappresenta, quindi, una delle componenti necessarie per la creazione di un ambiente "sostenibile". In questo contesto è possibile definire per l'industria delle costruzioni (6) alcuni principi ai quali riferirsi (Tab. 1).

Tab. 1 I principi della costruzione sostenibile
Si evidenziano alcuni principi ai quali riferirsi affinché l'industria delle costruzioni partecipi alla creazione di un ambiente "sostenibile" (Kibert, 1994[1], p. 7).

1. Minimo consumo delle risorse
   Questo principio comporta il contenimento del consumo energetico negli edifici attraverso l'efficienza degli impianti ed elevati livelli di coibentazione (7), l'utilizzo di materiali di lunga durabilità e bassa manutenibilità.
2. Massimo riuso (8) delle risorse
   Questo principio comporta, in termini particolari, il riutilizzo di materiali o componenti (per esempio laterizi e serramenti), e in generale, l'attenzione verso il patrimonio edilizio esistente (9).
3. Uso di risorse rinnovabili e riciclabili
   Questo principio comporta nel campo energetico il ricorso all'energia solare, eolica e idrica, oppure nel campo dei materiali l'utilizzo delle materie plastiche ma anche del legno o dell'acciaio, oppure ancora nel campo delle tecniche esecutive il riferimento alle tecniche di assemblaggio a secco.
4. Rispetto della qualità dell'ambiente costruito
   Questo principio comporta il riferimento al contesto naturale, quando si parla di operazioni legate a nuovi insediamenti urbani (deviazioni di corsi d'acqua, drenaggio di paludi, deforestazione); oppure concerne l'uso di materiali da costruzione contenenti sostanze tossiche e pericolose che minacciano la salute dell'uomo (piombo, amianto, solventi); oppure riguarda la corretta progettazione degli spazi, perché se male utilizzati, a lungo andare, si degradano e cadono in disuso.

Come si può osservare, il paradigma della sostenibilità presenta sfide e opportunità per l'industria delle costruzioni, in un quadro di trasformazione culturale e di riorganizzazione produttiva che attraversa tutti i comparti della società. Da un punto di vista generale, le tendenze che vanno a interessare il settore delle costruzioni possono essere le seguenti:

- la maggiore onerosità dei processi e dei materiali inquinanti usati nelle costruzioni, così come dei sistemi di smaltimento a essi collegati (a causa dell'imposizione di tasse tendenti a scoraggiarne l'utilizzo);
- la riduzione, da parte delle imprese costruttrici, delle emissioni inquinanti;
- la creazione di nuovi mercati per l'efficienza energetica degli edifici, legati a installazioni più efficienti, sistemi energetici meno inquinanti, adeguamenti tecnologici sugli edifici esistenti;
- la maggiore attenzione alle problematiche ambientali di committenti pubblici e privati, dovuta alla crescita di una diffusa sensibilità sul tema (10);
- la disponibilità di nuove risorse finanziarie per progetti con benefici ambientali e la crescita dei progetti infrastrutturali, tesi a riequilibrare il costruito con il contesto.

1.1.1 Il concetto di "qualità ambientale". Materiali, tecniche e operatori

La questione della sostenibilità coinvolge il settore delle costruzioni con problematiche importanti e diverse tra loro: l'impatto dell'edilizia sull'ambiente circostante, l'impatto sull'ambiente in senso globale (in termini di consumo di risorse e di energia, di produzione di emissioni nocive ecc.) (11). Il progetto contemporaneo deve considerare i vincoli posti dall'ambiente con l'obiettivo di nuovi criteri di qualità: non si tratta più di parlare in termini di tempi, qualità funzionale e costi, ma bisogna introdurre il concetto di "qualità ambientale": questo comporta che per un materiale o una tecnica esecutiva si parli di *eco-bilancio* (12), che per una impresa si parli di *eco-efficienza* (13), che per gli attori coinvolti nel processo costruttivo si parli di *responsabilità estesa* (14) all'intero ciclo di vita dell'edificio. Introdurre l'eco-bilancio e l'eco-efficienza nella valutazione di materiali e tecniche esecutive significa considerarne l'impatto sull'ambiente durante l'intero ciclo di vita (15): così come i designers e l'industria collaborano per migliorare le performance ambientali dei beni di consumo, in egual modo si può pensare che progettisti e mondo delle costruzioni facciano lo stesso per le costruzioni, per esempio attraverso:

- la riduzione del numero di componenti utilizzati (plurifunzione), in modo da migliorarne la riciclabilità e ridurre l'impiego di materia prima;

- l'utilizzo di materiali con prestazioni migliori che permettano di ottenere componenti più leggeri;
- una progettazione studiata per favorire il disassemblaggio, con l'uso di tecniche che favoriscano la smontabilità dell'edificio.

Affrontare il tema di una progettazione attenta all'intero ciclo di vita del prodotto fa nascere l'esigenza, inoltre, di ampliare la classificazione delle tecniche, perché "nel progetto, assieme al problema delle tecniche di produzione, di assemblaggio e di consumo, si rende ormai necessario considerare anche il problema delle tecniche di riciclaggio" (Nardi, 1990, p. 16): una costruzione e una progettazione che rendano possibile il riciclaggio costituiscono un requisito fondamentale per un successivo riutilizzo dei prodotti (nel caso delle costruzioni i prodotti da demolizione) a convenienti livelli economici. Di conseguenza, ai progettisti e ai responsabili della produzione viene richiesto di integrare tra le proprie competenze tale requisito: in tal senso, il quadro normativo generale internazionale mostra una evoluzione delle politiche ambientali verso soluzioni che tendono a estendere la responsabilità del produttore, da intendere come l'insieme di tutti gli attori sociali connessi con il produrre, alle diverse fasi della vita dei prodotti e, in particolare, alla fase della loro dismissione. Al ruolo tradizionale del progettista rivolto a trovare risposte adeguate alle esigenze funzionali e formali di un edificio (16), si affianca quello teso a garantire il mantenimento di condizioni ambientali apprezzabili: ciò significa, in ultima analisi, farsi carico non solo delle attività relative alla costruzione, ma anche di quelle relative alla dismissione dell'edificio, e quindi di ciò che può concernere la raccolta, il trattamento e la valorizzazione dei materiali e componenti dismessi.

1.1.2 Il progetto architettonico orientato alla "sostenibilità"

L'architettura come momento primo della riconciliazione tra uomo e natura, cioè di quel cammino di comprensione della natura che l'uomo ha intrapreso con l'abitare (Norberg-Schulz, 1979), si prefigura come attività "ecologica": la progettazione architettonica deve, quindi, recuperare la compatibilità ecologica come qualità interna. In tal senso i principi della "costruzione sostenibile" e il concetto di "responsabilità estesa" si devono tradurre, positivamente e propositivamente, da un lato come minimo impiego di risorse energetiche non rinnovabili e massimo riuso dei materiali,

dall'altro lato come attenzione alle tecniche di riciclaggio. Ma occorre sottolineare come la sola tecnologia del riciclo non possa che essere un palliativo al problema di contenimento del degrado ambientale, se riferito al mondo delle costruzioni, e in tal senso vada integrata con strategie quali il progetto per disassemblare e il recupero delle demolizioni. Si tratta, cioè, di creare nel progettista una mentalità abituata a considerare il ciclo di vita di un prodotto, quindi anche di un edificio, nell'ottica di un suo massimo prolungamento, attraverso l'attenzione verso nuovi paradigmi quali:

- le tecniche di assemblaggio a secco (le tecniche di prefabbricazione; l'uso di componenti prodotti industrialmente; le strutture in acciaio; i materiali compositi), che comportano, oltre alla riduzione dei costi di messa in opera e di gestione dell'organismo edilizio, anche l'aumento della durata del componente per la migliore manuntenibità;
- la manutenzione programmata (17) (ispezionabilità degli impianti; gestione della costruzione in modo tale da avere una sola impresa responsabile della parte impiantistica; massima attenzione alla definizione del dettaglio costruttivo);
- la flessibilità funzionale (flessibilità tipologica, perché allunga i tempi di obsolescenza degli edifici; la flessibilità del componente, perché aumenta le possibilità di riciclo);
- la disassemblabilità della costruzione (numero basso di connessioni; accessibilità dei punti di connessione; reversibilità delle connessioni; uso di monomateriali o bassa varietà di materiali in modo da facilitare la scomposizione dei diversi costituenti al momento dello smontaggio; tecniche di recupero e riuso dei materiali) come maggiore possibilità di riciclaggio dovuta all'accresciuta separabilità e smontabilità.

La questione della "sostenibilità" determina un progressivo avvicinamento tra le logiche interne al settore delle costruzioni e le logiche degli altri settori industriali, già da diverso tempo tese a rendere eco-compatibili i propri prodotti: in questo senso, i materiali possono svolgere un ruolo propulsivo verso tale avvicinamento, sia nel caso dell'innovazione tecnologica legata ai nuovi materiali, sia nel caso delle ricerche connesse al riutilizzo di materiali provenienti da demolizioni oppure provenienti da dismissione di beni di consumo (18).

1.2 Il riciclo in edilizia: le condizioni di possibilità

Le motivazioni al riciclo in edilizia, il livello prestazionale dei componenti edilizi, i tempi di dismissione, l'esigenza di un quadro normativo e legislativo efficiente, i comportamenti e le convizioni diffuse - L'innovazione tecnologica, l'introduzione di nuovi materiali, la mimési, il processo di sostituzione dei materiali, i fattori culturali - Il panorama storico delle esperienze di riciclo in edilizia, il riciclo di materiali da costruzione, il riciclo di materiali estranei al settore, i muri a sacco, il cocciopesto, il muro a gettata, il riuso di materiali pregiati, gli additivi cementizi - I residui da costruzione e demolizione, le cause e i problemi, i vincoli tecnici, i paradigmi progettuali, le possibilità di riutilizzo.

La questione della "sostenibilità" pone il problema del riciclo di materiali in edilizia sia come variabile esogena, dovuta alla disponibilità di materiali che possono essere utilizzati all'interno del processo costruttivo, sia come variabile endogena, che coinvolge cioè il riciclo di materiali di demolizione. Per affrontare il tema del riciclo in edilizia, delineandone un quadro esauriente, è opportuno approfondirne le condizioni di possibilità, condizioni che sono legate al percorso delle innovazioni, intendendo la sostenibilità come "vincolo propositivo" (19) che può indurre altri processi nel settore edilizio; inoltre, tali condizioni appartengono al panorama storico che caratterizza il rapporto riciclo-edilizia e, infine, sono connesse alle problematiche del riciclo degli scarti da costruzione e da demolizione. Prima di procedere in questo approfondimento, è opportuno domandarsi quali siano le motivazioni che possono spingere a riciclare materiali in edilizia e quali quelle che possano frenare tale processo: a questo riguardo Claudio Molinari (1990) individua, come motivazioni a favore, il livello prestazionale e il tempo di vita dei componenti e dei materiali utilizzati in edilizia, perché il livello prestazionale è generalmente inferiore a quello richiesto da molti prodotti industriali (in quanto nelle costruzioni materiali e componenti non devono necessariamente raggiungere la prestazione ottimale per svolgere la loro funzione, anche in relazione ai coefficienti di sicurezza utilizzati, a esempio nel calcestruzzo e nell'acciaio) (20), e perché l'utilizzo di materiali riciclati per realizzare elementi costruttivi permette di allungare i tempi di dismissione di prodotti a bassa durabilità. Accanto a queste motivazioni, che potremmo definire strutturali, ve ne sono altre di carattere infrastrutturale, legate, da un lato, all'esigenza di un quadro normativo e legislativo che consenta di fornire un prodotto più appetibile al riciclatore (tasse, incentivi) e di avere le informazioni necessarie per un suo corretto utilizzo (marcatura, specifiche tecniche, certificazioni), e, dall'altro lato, alla creazione di un mercato del riciclo ben strutturato, con la presenza di operatori

specializzati. Esistono poi comportamenti e convizioni che, invece, possono agire in senso contrario alla diffusione di una pratica del riciclo, legati a una consapevolezza ambientale non ancora matura, e a una presunta invulnerabilità del settore delle costruzioni alle problematiche connesse al reperimento di materie prime e allo smaltimento di rifiuti: in questo senso è probabile che, in un futuro molto prossimo, il progressivo esaurimento delle possibilità estrattive (21) di materiali quali sabbia, ghiaia, calcare e argilla, unito alla sempre maggiore presenza di prodotti di sintesi non inerti tra i materiali da costruzione (sistemi di impermeabilizzazione, di coibentazione, di insonorizzazione, giunti, guaine, prodotti protettivi, vernici, ecc.) e all'incremento dei costi di conferimento in discarica, trasformino queste convizioni, radicate tra gli operatori e gli utenti del settore edilizio, in altrettante spinte verso le tecniche di riciclaggio.

1.2.1 Il percorso delle innovazioni

"L'innovazione (sociale, culturale e produttiva) è un fenomeno complesso che passa per diverse strade e che può essere mosso da diversi motori: ciò che può accadere è che anche il presentarsi di un vincolo possa diventare l'elemento propulsivo di nuove possibilità. Potrà forse così avvenire che la scoperta dei limiti ambientali con cui oggi dobbiamo confrontarci si trasformi in fattore dinamico e propulsivo" (Manzini, 1990[1], p.12). Questa previsione appare del tutto fondata: infatti, storicamente, l'innovazione tecnologica (22) ha svolto un ruolo determinante nella soluzione di problemi legati alla scarsità di risorse, per esempio sviluppando tecniche più efficienti per la loro estrazione, oppure minimizzando gli scarti di produzione (23), oppure ancora creando sostituti di sintesi dei materiali naturali. Ma se le componenti tecniche ed economiche sono sufficienti a delineare, in senso generale, il problema dell'innovazione, nel caso dell'architettura tale problema assume connotati del tutto particolari, in quanto i percorsi delle innovazioni (24) risultano fortemente influenzati da resistenze di carattere culturale e simbolico. Nel caso dell'introduzione di nuovi materiali (e lo stesso sarebbe per le tecniche esecutive), accade quindi che, per rendere più morbida (o più accettabile) l'innovazione da un punto di vista culturale, d'uso e di costume, si ricorra, in modo più o meno conscio, al processo di mimèsi (25), dove il nuovo materiale tende ad assumere l'immagine del materiale sostituito:

questo processo da un lato veicola l'innovazione attraverso una fase di transizione, dall'altro lato ne rallenta l'evoluzione, soprattutto perché applicazioni formalmente legate alle caratteristiche del vecchio materiale impediscono di sviluppare in modo ottimale il livello prestazionale di quello nuovo. Solo quando, entrato a far parte del patrimonio sedimentato di immagini e di significati che si ricollegano alla cultura materiale collettiva, e in seguito all'adeguamento del sapere tecnico e scientifico dei progettisti, il nuovo materiale risulta completamente accettato, esso può sviluppare nuovi aspetti compositivi e formali legati alle sue intrinseche capacità espressive: le caratteristiche innovative del materiale possono, a questo punto, influenzare anche le tradizionali metodologie costruttive, per esempio con la ricerca di connessioni più adeguate ai nuovi componenti realizzati, generando quindi altre innovazioni a cascata.
Alla luce di queste considerazioni, appare chiaro, dunque, come le condizioni di possibilità dello sviluppo di tecnologie di riciclaggio in edilizia, così come l'effettiva diffusione di elementi innovativi a esse connesse, siano legate a fattori economici e culturali temporalmente e geograficamente variabili.
In questo senso, la questione ambientale può rappresentare per l'edilizia un momento evolutivo: affinché le potenzialità e i vantaggi a essa connessi si possano evidenziare in maniera completa occorre, però, un periodo di transizione di durata non definibile. Tale periodo è caratterizzato, dal punto di vista tecnico, dalla compresenza di vecchia e nuova tecnologia, ed è legato ai tempi della sedimentazione culturale e della apprendimento tecnico. Ciò ribadisce, ancora una volta, l'esigenza che, nel campo delle costruzioni, il processo di sostituzione dei prodotti tradizionali con prodotti riciclati parta dalle necessità dell'architettura, quindi dal consolidamento della cultura materiale legata al riciclo, e non da una pura disponibilità materiale, cioè da un approccio meramente quantitativo.

1.2.2 Le esperienze di riciclo nella storia delle costruzioni

Nella storia delle costruzioni esistono diversi esempi di applicazioni che possono ricollegarsi alla pratica del riciclo: questi esempi, da un lato, confermano che sono indispensabili motivazioni tecniche ed economiche affinché le tecniche di riciclaggio si radichino nel settore delle costruzioni e, dall'altro lato, sono esemplificativi di

come la necessità di ridurre lo spreco di risorse, oppure la scarsità delle risorse stesse, possano generare processi innovativi nel settore. Il riciclo e l'edilizia, dunque, si sono più volte confrontati, sia per l'intrinseca capacità del settore a riciclare, capacità legata alle ragioni strutturali precedentemente analizzate, sia per i cicli di relativa scarsità delle risorse e dei materiali impiegati nelle attività di costruzione, cicli spesso conseguenti a problemi di trasporto dei materiali stessi. Tra i casi che vengono di seguito considerati (Rigamonti, 1996, pp. 131-139), alcuni, quelli che rientrano nel campo del riciclo di materiali da costruzione, sono stati citati per testimoniare l'esistenza di una consuetudine culturale e materiale che supporta il riciclaggio di materiali in edilizia, altri, invece, relativi a materiali originariamente estranei all'architettura, vogliono rafforzare l'ipotesi, sostenuta in questa tesi, circa la fattibilità e la convenienza relativi all'impiego di residui di altri settori in edilizia.
La pratica di riciclaggio più nota risale senz'altro al periodo romano, durante il quale si è consolidata la costruzione dei cosiddetti muri a "sacco" (26), attraverso l'utilizzo di materiali provenienti da distruzioni belliche, terremoti e incendi (detriti, pietrame e altro materiale incoerente). La tecnica del muro a "sacco", o a concrezione, viene dapprima utilizzata, per le sue qualità economiche e funzionali, nel campo delle opere utilitarie (magazzini di merci, acquedotti, porti), ma, in seguito, è introdotta anche nella realizzazione di più impegnativi edifici pubblici (santuari, anfiteatri, aule termali ecc.): essa permette il "sostanziale rinnovamento della concezione dell'architettura intesa come involucro dello spazio e lo straordinario sviluppo e ardimento delle strutture a volta" (Bairati, Finocchi, 1984, p.124). Un'altro esempio tipico del periodo romano, relativo al riciclo di materiali di scarto, è l'uso del cocciopesto, cioè di mattoni cotti male o rotti che, una volta frantumati, vengono aggiunti alle malte nei getti di fondazione in terreni sottofalda (per esempio questa tecnica è usata nei getti della basilica di S.Ambrogio a Milano): l'azione dei cocci frantumati è legata alla loro attività pozzolanica (27), che da luogo a malte estremamente impermeabili e resistenti al dilavamento dell'acqua. Le esperienze di riciclo caratterizzano anche l'architettura romanica: nel cosiddetto "muro a gettata" i blocchi spigolosi e i residui delle pietre più grandi e liscie, utilizzate come paramento esterno, diventano, mescolate ad abbondante malta, riempimento, per il quale spesso si usa anche materiale vecchio (Kubach, 1972, p.382). Anche nei palazzi signorili del Rinascimento il nucleo della parete è composto da muratura di mattoni, detriti e da materiali di riciclo mentre l'esterno è

rivestito da blocchi di pietra lisci o bugnati (Singer, et alii, 1961, cap. 10). Alla pratica del muro a concrezione, così come sviluppata nelle diverse epoche, va affiancato il processo di riuso dei materiali pregiati, basti pensare a quanto avvenuto alla maggior parte delle opere romane, divenute, a partire dal VII-VIII secolo d.c., una sorta di riserva di materiali ottimamente lavorati, spesso di alto pregio, cui si attinge largamente per le nuove costruzioni.
In tempi recenti esistono, invece, esempi di riciclo di sottoprodotti di particolari lavorazioni come additivi del cemento: è il caso dell'utilizzo di ceneri volanti ("fly ashes"), derivate da combustione di carbone o ligniti nelle centrali termiche, o del fumo di silice, sottoprodotto della lavorazione dell'acciaio siliceo; questi sottoprodotti vengono aggiunti al clinker cotto e macinato e svolgono la duplice azione di fissare la calce nel cemento (per la presenza di silice molto reattiva) e di intasare i pori del calcestruzzo per la loro elevata finezza, dando luogo a malte estremamente impermeabili; oppure è il caso dell'utilizzo di scorie basiche granulate (loppe) (28) nei cementi d'altoforno, che così additivati risultano particolarmente resistenti agli attacchi chimici (in particolare da parte di sali solfati) e al dilavamento (29).

1.2.3 Il riciclo dei residui da costruzione e da demolizione

La questione ambientale e il problema del riciclo affermano, anche per l'edilizia, il concetto che esiste un valore nel materiale da costruzione dismesso e pongono come prioritario il riciclo dei rifiuti da costruzione e da demolizione (30): i materiali di risulta provenienti dalla costruzione e dalla demolizione di edifici costituiscono, infatti, "una delle principali emergenze ambientali, anche a causa dell'inadeguatezza delle strutture preposte al loro stoccaggio e dei costi per il loro trattamento, sia che si tratti di smaltimento che di trasformazione" (Morfini, 1993[1], p. 934) (31). La mancanza, anche da un punto di vista legislativo, di adeguati incentivi che spingano le imprese a orientarsi verso il riciclo dei materiali da costruzione, unitamente al costo relativamente contenuto della dismissione in discarica, rendono oggigiorno il riciclaggio dei materiali edili non competitivo dal punto di vista economico (32): questo comporta che il comportamento diffuso continui a consistere nella demolizione e nell'accatastamento indifferenziato delle macerie, tanto che attualmente solo il 10% del materiale demolito può essere riutilizzato (Rigamonti, 1993, pp.

935-938). Il problema viene accentuato dalla mancanza di un atteggiamento progettuale teso a favorire, dopo la demolizione, il riciclo dei materiali da costruzione; tale mancanza comporta la difficoltà a separare materiali diversi in fase di trattamento dei rifiuti, compromettendo il grado di purezza dei materiali riciclati: ciò diminuisce notevolmente le possibilità di utilizzo di tali materiali in quanto, in alcune applicazioni, esistono vincoli tecnici ben precisi da rispettare (per esempio il rispetto della granulometria del calcestruzzo quando si usano detriti frantumati come aggregato, oppure la finezza della pasta di legno, ottenuta dalla macinazione di scarti legnosi, nel ciclo della carta).
In tal senso la limitazione quantitativa e la qualificazione dei materiali di risulta non può che passare attraverso un processo di responsabilizzazione di tutti i soggetti coinvolti nel processo costruttivo (a partire dall'utenza che, troppo spesso, lega la ristrutturazione degli edifici e la sostituzione di materiali e componenti a ragioni di gusto e non alla loro effettiva obsolescenza prestazionale): da un punto di vista progettuale si è già osservato come una strategia di limitazione dei rifiuti edilizi si leghi al prolungamento del ciclo di vita dei materiali e componenti usati e, quindi, a precise scelte nelle tecniche esecutive adottate. L'assemblaggio a secco, la manuntenibilità e il disassemblaggio sono, dunque, i paradigmi progettuali che bisogna assumere come strategia "sostenibile" nelle costruzioni, anche nell'ottica di un massimo recupero dei prodotti della demolizione edilizia: tale strategia deve perseguire una sempre più differenziata selettività nelle fasi di demolizione e una progressiva riduzione dei prodotti di risulta non riciclabili. Questa tendenza, già ampiamente in atto in numerosi paesi europei (Olanda, Danimarca, Germania, Austria, Svizzera, Francia, Belgio, ecc.) (Bassan, Galimberti, 1996, p. 35), dovrebbe trovare in tempi brevi un corretto inquadramento nell'ambito di normative europee attualmente in fase di elaborazione (33).

Tab. 2 Possibilità di utilizzo dei rifiuti da costruzione e da demolizione considerati, ai sensi del D.M. del 5.9.95, inerti e assimilabili

Si analizzano, in modo sintetico, le principali applicazioni attualmente realizzate con i materiali edilizi riciclati (Morfini, 1993[1], pp. 936-938; Nironi, 1993-94; Abraham, 1994, p. 761; Morfini, 1995).

1. Calcestruzzo.
   Le possibilità di utilizzo sono sottoforma di aggregato per nuovo calcestruzzo (34) in sostituzione di aggregato naturale (tranne che per la parte fine). Le macerie di calcestruzzo devono essere frantumate e vagliate, le parti metalliche eventualmente contenute possono essere asportate mediante sistemi magnetici. L'aggregato riciclato può essere impiegato per calcestruzzo (sottofondi stradali, muri di sostegno), oppure per la costruzione di blocchi da costruzione, ecc. L'aggregato ottenuto dalla frantumazione del calcestruzzo può essere utilizzato anche come sottofondo per tappeti erbosi, campi da tennis, discariche, e per realizzare mattoni in silicato di Calcio, adatti, per esempio, per pavimentazioni di piste ciclabili (Maydl, 1994). Varie esperienze hanno, inoltre, dimostrato che il calcestruzzo prodotto con gli inerti da muratura riciclata può avere proprietà di isolamento termico e resistenza al fuoco migliori di quello prodotto con materiale vergine.
2. Laterizi (tegole, mattoni).
   Le possibilità di utilizzo sono sottoforma di granuli come ghiaietto per sottofondi stradali o aggregato per calcestruzzo. Il riuso è comunque la pratica ancora più diffusa.
3. Intonaci e prodotti vernicianti.
   Le possibilità di utilizzo sono nulle in quanto la presenza di diversi strati sottili sovrapposti (spessore massimo 3 cm.) e di pellicole sintetiche ne impedisce la corretta separazione (35). Nel caso di pannelli montati a secco in gesso è possibile e produttivo riciclare il gesso che, dopo la macinazione, può essere sottoposto a nuove cotture e reimpiegato come materia originaria.
4. Metalli ferrosi (ferro, ghisa, acciaio).
   Le possibilità di utilizzo sono quelle relative alla materia vergine in quanto vengono rifusi (le normativa ne vieta il reimpiego diretto).

Tab. 3 Possibilità di utilizzo dei rifiuti da costruzione e da demolizione non considerati, ai sensi del D.M. del 5.9.95, inerti e assimilabili

Si analizzano, in modo sintetico, le principali applicazioni attualmente realizzate con i materiali edilizi riciclati (Morfini, 1993[1], pp. 936-938; Nironi, 1993-94; Abraham, 1994, p. 761; Morfini, 1995).

1. Metalli non ferrosi (rame, piombo, alluminio).
   Le possibilità di utilizzo sono quelle relative alla materia vergine in quanto vengono rifusi. Nel caso dell'alluminio il riciclo è particolarmente vantaggioso (qualora non sia ibridato ad altri materiali) perché i processi di riciclaggio utilizzano solo il 5% dell'energia utilizzata per estrarre dalla bauxite l'alluminio primario.
2. Materiali isolanti.
   Le possibilità di utilizzo di lana di vetro, vetro alveolare, polistirene espanso ed estruso sughero espanso (36), esistono ma non sono praticate perché non economiche. Per i materiali bituminosi le possibilità di utilizzo sono quelle relative al normale ciclo di produzione in quanto vengono rifusi.
3. Vetro.
   Le possibilità di utilizzo sono quelle relative al normale ciclo di produzione di bottiglie e oggetti di vetro, schiume e lane di vetro. Il vetro viene reimpiegato direttamente solo in casi eccezionali (vetrocemento). Esiste inoltre la possibilità di realizzare intonaci di facciata con inerte di vetro riciclato.
4. Legno (travi, travetti e infissi).
   Le possibilità di utilizzo sono come combustibile oppure, attraverso la riconversione del legname con metodologie di tipo chimico-meccanico in pasta di legno, nella produzione della carta. È possibile il reimpiego diretto, previe operazioni di pulitura, consolidamento e conservazione, oppure, previa triturazione, come truciolato. Nel caso del legno massello dismesso la quantità riutilizzabile può raggiungere l'85% del materiale, se proveniente da tamponamenti, e il 60%, se proveniente dalle coperture. Nel caso di componenti prodotti con derivati del legno il riciclo dipende dal tipo di derivato e dalle resine collanti utilizzate per la produzione e finitura. Recentemente è stato sperimentato un composito legno-cemento, con fibre di legno provenienti da impianti di riciclaggio di scarti da costruzione e da demolizione, per realizzare casseri a perdere per muri isolati (Frank, 1994).
5. Materie plastiche.
   Le possibilità di utilizzo sono quelle relative al ciclo della plastica riciclata. Sono note applicazioni come materiale isolante, additivi per calcestruzzo. Il polivinilcloruro (PVC) proveniente dalla granulazione di serramenti dismessi può essere utilizzato per manti impermeabilizzanti o canalizzazioni.

1.3 Il quadro legislativo

Il rapporto tra aspetti legislativi, economici e tecnici, i livelli di approfondimento - Il quadro italiano e comunitario, la Legge 366/41, la conferenza di Stoccolma, la Direttiva 75/442, il DPR 915/82, le normative settoriali, la Direttiva 85/339, la Legge 475/88, i consorzi nazionali obbligatori, il DM 443/93, le Direttive 91/156 e 91/689, i DM 5.9.94 e 29.9.94, la Direttiva 94/62/CE, la proposta di legge "Gerardini", gli obiettivi di riciclaggio, la responsabilità solidale - La normazione sulle materie da riciclo, condizioni per lo sviluppo di un mercato competitivo, livelli qualitativi e prestazionali, norme in corso di elaborazione a livello europeo, il progetto di norma 602 - La certificazione come innovazione necessaria, i marchi ecologici, la certificazione sul singolo prodotto, la Direttiva 89/106, il marchio CE.

Le attività inerenti il riciclo di materiali, oltre a essere legate alla sfera tecnica, sono influenzate da altri due fattori, tra loro collegati: il fattore legislativo e quello economico (Pinetti, 1994[1]). Se la soluzione degli aspetti tecnici legati alla lavorazione e all'impiego dei materiali riciclati è una condizione di possibilità necessaria, senza un valido substrato economico-legislativo (incentivi, sgravi fiscali, domanda pubblica, investimenti di ricerca) nessuna attività di riciclo può raggiungere adeguati livelli di competitività. Per esempio, l'approvvigionamento di materiali da destinare al riciclo può risultare ostacolato dall'assenza di un piano di natura giuridica di gestione dei rifiuti, mentre inopportuni provvedimenti possono determinare ostacoli di natura burocratica allo sviluppo di lavorazioni di riciclo (autorizzazioni per la raccolta, trasporto, trattamento, riutilizzo, ecc.); non ultimo, la competitività del materiale riciclato va tutelata nei dovuti modi, dato che, se vista sotto il profilo economico, dipende dall'andamento sul mercato dei prezzi del materiale vergine.
Alla luce di queste considerazioni si comprende come la conoscenza degli schemi giuridici sperimentati a livello nazionale e internazionale rappresenti un valido aiuto anche in casi, come questa tesi, dove l'aspetto principale valutato è quello tecnico: in questo senso lo scopo che si intende perseguire è quello di evidenziare, più che le tematiche specifiche trattate nei singoli provvedimenti giuridici, il carattere di interrelazione tra obiettivi della legge e processo industriale.
In particolare, nel caso delle materie plastiche di riciclo utilizzate in edilizia, si ritiene necessario focalizzare l'attenzione su:

- la legislazione nazionale e le direttive comunitarie inerenti la gestione dei rifiuti, perché esse influenzano la disponibilità o meno di materiali di riciclo e, quindi, lo sviluppo o meno di processi di riciclaggio;

- la normativa allo studio sui materiali plastici riciclati, perché l'esistenza di specifiche tecniche chiare e definite è una garanzia e una condizione essenziale per lo sviluppo di un mercato di prodotti riciclati;
- le certificazioni inerenti le costruzioni e i prodotti da costruzione, in quanto possono rappresentare uno stimolo verso la ricerca di soluzioni eco-compatibili.

1.3.1 La legislazione nazionale e le Direttive comunitarie sull'ambiente e sui rifiuti

Le problematiche ambientali sono state oggetto, a partire dagli anni '70, di una intensa attività legislativa, sia a livello nazionale che a livello comunitario: ragionare sui contenuti e sugli obiettivi di questi provvedimenti può aiutare a delineare il contesto evolutivo delle attività di riciclo nei prossimi anni.
Nella legislazione italiana il primo atto che si riferisce ai rifiuti è la Legge n. 366 del 20 Marzo 1941 sulla "*Raccolta, trasporto e smaltimento dei Rifiuti Solidi Urbani*": in relazione ai materiali recuperabili l'art. 20 della legge sancisce che << [...] tutti i rifiuti solidi urbani devono essere sottoposti, per quanto possibile, ad un trattamento tale che assicuri, nel miglior modo, ai fini dell'economia nazionale e della lotta contro gli sprechi, la loro utilizzazione industriale ed agricola, conformemente ai progressi della tecnica a seconda di direttive che il Ministero dell'Interno impartirà al riguardo [...] >>. Dal 1941 la legislazione sui rifiuti osserva un lungo periodo di riposo (37) e il quadro normativo resta sostanzialmente immutato fino alla Conferenza delle Nazioni Unite sull'ambiente (tenutasi a Stoccolma nel 1972) che segna a livello comunitario, e per ricaduta a livello nazionale, l'origine di una politica ambientale tesa alla salvaguardia delle condizioni di vita e delle risorse naturali. È con l'Atto Unico Europeo (Lussemburgo, 17 Febbraio 1986; L'Aja, 28 Febbraio 1986) che l'ambiente assurge a politica ufficiale della Comunità Europea: i principi posti alla base dell'intera politica comunitaria per l'ambiente sono, secondo l'art. 130R, comma 2, l'azione preventiva e il famoso criterio del "chi inquina paga". Va sottolineato che già la Direttiva 75/442 prevede, tra le azioni tese alla tutela ambientale, anche l'adozione di misure atte a promuovere il riciclaggio e la trasformazione dei rifiuti: di "*Attuazione delle direttive (CEE) n. 75/442, relativa ai rifiuti, e 78/319, relativa ai rifiuti tossici e nocivi*" è il Decreto del Presidente della Repubblica n. 915

del 10 Settembre 1982 che, all'art. 1, comma e), dispone che << devono essere promossi, con l'osservanza di criteri di economicità ed efficienza, sistemi tendenti a riciclare, riutilizzare i rifiuti o recuperare da essi materiali ed energia >>. La successiva Legge n. 441 del 29 Ottobre 1987, sulle "*Disposizioni urgenti in materia di smaltimento dei rifiuti*", all'art. 3, comma 1, delega alle regioni il compito di favorire << [...] la raccolta differenziata e le soluzioni di smaltimento che consentano il riutilizzo, il riciclaggio e l'incenerimento con recupero di energia. Le regioni debbono, in particolare, determinare le modalità di selezione, preliminari all'incenerimento, al compostaggio e al riciclaggio, dei rifiuti solidi urbani, con specifico riferimento alle materie plastiche cloro-derivate [...] >>.
Come si può osservare, le leggi e le direttive sinora citate sono d'indirizzo generale, scarsamente efficaci da un punto di vista operativo, soprattutto se riferite allo sviluppo di tecniche di riciclaggio: per rafforzare le azioni di recupero e riciclo la legislazione comunitaria, e sulla scia quella italiana, si orienta verso normative specifiche, soffermando la propria attenzione su ristrette categorie di beni (38). È con questo spirito che viene adottata la Direttiva 85/339 relativa agli imballaggi per liquidi alimentari che, all'art. 1, definisce una serie di azioni relative << alla produzione, alla commercializzazione, all'uso, al riciclaggio [...] degli imballaggi >> e, all'art. 4, dispone << la raccolta selettiva, procedimenti efficaci di prelievo degli imballaggi dai rifiuti domestici, sbocchi per i materiali ricavati dagli imballaggi usati >>. Vengono, dunque, individuate per la prima volta due questioni nodali della materia: la prima è che il riciclo non riguarda il solo smaltimento, ma deve già essere considerato nella fase di produzione; la seconda è che bisogna definire e incentivare gli sbocchi per i materiali ottenuti da prodotti riciclati. In senso operativo, per quanto concerne la legislazione italiana, può essere considerata come punto di svolta la Legge n. 475 del 9 Novembre 1988, sulle "*Disposizioni urgenti in materia di smaltimento dei rifiuti industriali*", che, all'art. 9-quater, istituisce << [...] i consorzi nazionali obbligatori per il riciclaggio di contenitori od imballaggi per liquidi in vetro, metallo e plastica [...] >>, i cui compiti sono quelli, definiti all'art. 4, di << [...] assicurare il riciclaggio, anche mediante avvio di aziende che recuperano materie prime secondarie oppure energia [...]; promuovere l'informazione degli utenti [...]; favorire forme corrette di raccolta e smaltimento [...] >>; all'art. 15 sono, inoltre, stabilite << [...] riserve di materiali riciclati da utilizzare obbligatoriamente nell'esecuzione di opere pubbliche e di

forniture ad amministrazioni ed enti pubblici nazionali, regionali e locali >>. In merito al riciclo di materiali plastici è indubbia la positiva influenza di questa legge, sia in termini di disponibilità di materiale omogeneo proveniente da specifici impianti di selezione, sia in termini di sviluppo di tecnologie per la lavorazione di miscugli di polimeri diversi (le cosiddette plastiche eterogenee).
Ai materiali provenienti dalle attività di riciclo viene attribuito lo status di "materia prima secondaria" definita, in base all'art. 2 del Decreto Ministeriale del 26 Gennaio 1990, << [...] residuo derivante da processi produttivi o da raccolte finalizzate che è suscettibile, eventualmente previo idoneo trattamento, di essere riutilizzato come materia prima in altro processo produttivo della stessa o di altra natura [...] >>. Tale decreto è successivamente annullato e sostituito dal Decreto Legge n. 443 del Novembre 1993 (oggi sostituito dal Decreto Legge 162/95) che introduce nell'universo dei rifiuti il concetto di residuo riutilizzabile, sia come materia prima che come fonte di energia, di fatto negando l'appartenenza della categoria dei residui destinati a riutilizzo alla più vasta accezione di rifiuto, e, quindi, la loro non assoggettabilità al DPR 915/82: ciò comporta per le attività di riciclo (raccolta, trasporto, trattamento e riutilizzo) un regime di autonotifica (ciò ha permesso la ripresa delle attività di recupero dei residui plastici, ostacolate dalla prevista autorizzazione ex DPR 915/82), in linea con i dettami delle Direttive comunitarie 91/156 e 91/689 in materia di incentivi al recupero attraverso la semplificazione delle procedure amministrative. Il Decreto Legge n. 443/93 rappresenta una importante svolta nella politica ambientale in materia di rifiuti, in quanto stabilisce, per la prima volta, norme chiaramente definite, che hanno il beneficio, da un lato, di riconferire alle imprese che trattano tali materiali la fiducia nel proprio operato e, dall'altro lato, di incrementare le attività nel settore, precedentemente frenate dal rischio di incorrere in uno smaltimento dei rifiuti non in ottemperanza con le prescrizioni di legge. In particolare, con i decreti attuativi della legge, Decreti Ministeriali del 5 Settembre 1994 e del 29 Settembre 1994 (attualmente in fase di aggiornamento), viene circoscritto in modo puntuale il campo di applicazione della normativa, sia per il recupero dei rifiuti in processi di combustione per la produzione di energia, sia per quello in processi produttivi per il recupero di materia prima: nel caso del recupero materiale, le norme tecniche considerano 22 classi di materiali, per ognuna delle quali vengono analizzate varie possibili tipologie di scarti, in relazione a diverse provenienze, con la definizione delle caratteristiche del residuo, dei

valori limite ammessi delle sostanze pericolose in essi contenute, delle attività di recupero e delle caratteristiche del prodotto ottenuto.
La forte proliferazione normativa che, sulla spinta di una maggiore sensibilità ecologica, caratterizza l'attività legislativa in vari stati europei (39) e, all'interno dei singoli stati, nelle singole regioni, ripropone a vari livelli l'esigenza di uniformare le diverse situazioni giuridiche venutesi a creare, anche in relazione al sorgere di distorsioni negli scambi di materiali riciclati per l'esistenza di obiettivi di recupero adottati con modalità e tempistiche differenti nei diversi paesi (40): questa esigenza porta la Comunità Europea a prevedere l'adozione di una direttiva indirizzata a tutti gli imballaggi e lo studio di progetti di proposta di direttiva per il settore dell'edilizia, dei trasporti (auto), elettrico-elettronico e ospedaliero (Pinetti, 1994[1], p. 6). La proposta di Direttiva 94/62/CE, "*Packaging and Packaging waste*", sugli imballaggi pone alcuni principi cardine in materia di recupero e di gestione dei rifiuti sul territorio comunitario: vengono imposti obiettivi di recupero compresi tra il 50% e il 65% in peso rispetto al totale dei rifiuti da imballaggio prodotti e obiettivi di riciclo compresi tra il 25% e il 45% in peso relativamente al totale dei materiali da imballaggio contenuti nei rifiuti da imballaggio, con un minimo del 15% per ogni materiale (carta, plastica, vetro, metalli, ecc.), viene introdotto in concetto di gestione integrata (rigenerazione meccanica, chimica, recupero energetico) dei rifiuti e viene prevista una banca dati e di requisiti tecnici inerente i materiali riciclati.
A livello nazionale, invece, è in via di approvazione in sede parlamentare la proposta di legge-quadro sulla gestione dei rifiuti (presentata dall'On. Franco Gerardini, atto n° C174, Camera dei Deputati, Commissione Ambiente, sede redigente), che ha come obiettivi il riordino della materia con l'abrogazione delle norme precedenti, la semplificazione delle procedure e l'adeguamento delle norme nazionali al dettato comunitario (Direttive 91/156, 91/689, 94/62/CE). In questa proposta di legge di particolare rilievo, per le ricadute che può avere sullo sviluppo di tecnologie di riciclo, è l'art. 38 che prevede (in riferimento alla gestione dei rifiuti da imballaggio, ma è ragionevole supporre che tali principi saranno nel tempo estesi a tutte le categorie di materiali e prodotti), al comma b, la << partecipazione alle operazioni di raccolta, recupero e riciclaggio di tutti gli operatori economici, secondo il principio della responsabilità solidale >>, al comma c, << l'introduzione di strumenti economici [...] al fine di disporre di fondi sufficienti al funzionamento dell'intero sistema >> e, al comma d, << l'introduzione di sistemi di

incentivazione per lo sviluppo di attività di recupero e riciclaggio nonché per garantire sbocchi al mercato per i materiali riciclati >>. Opportune riflessioni si impongono poi, nell'ottica dei materiali da costruzione, sui principi introdotti dall'art. 41 (sempre riferiti ai rifiuti da imballaggio) che, al comma 6, vieta << lo smaltimento in discarica degli imballaggi e dei contenitori recuperati ad eccezione degli scarti derivanti dalla selezione degli imballaggi recuperati >> e, al comma 10, vieta di << immettere sul mercato contenitori od imballaggi che non possano essere correttamente smaltiti e per i quali non sussista la possibilità di recupero come materia prima o come fonte di energia >>.
Dunque, la Direttiva Comunitaria 94/62/CE, per gli elevati obiettivi di recupero imposti (peraltro recepiti anche dalla legge Gerardini), e la proposta di legge-quadro, per i principi che introduce, rappresentano oggi gli strumenti giuridici che maggiormente possono contribuire alla disponibilità di significative quantità di materiale post-consumo da inviare al riciclo e allo sviluppo, da un lato, di un atteggiamento responsabile di tutti gli operatori economici coinvolti nei processi di produzione e, dall'altro lato, di mercati competitivi di prodotti riciclati.

1.3.2 La normazione sulle materie plastiche di riciclo

I materiali plastici riciclati risentono, in termini prestazionali, delle variazioni di caratteristiche dovute al processo di trasformazione in manufatto, alle sollecitazioni imposte durante il ciclo di vita del prodotto, all'inquinamento da altri materiali. L'impiego di materia prima riciclata per ottenere nuovi manufatti deve perciò essere limitato ai manufatti le cui esigenze prestazionali siano tali da consentirlo: in molti casi il taglio di materiali vergini con materiali riciclati può creare un decadimento delle prestazioni del manufatto nel tempo, anche con gravi conseguenze, la cui entità non è facilmente prevedibile. Esistono peraltro manufatti, come per esempio quelli per l'edilizia, le cui prestazioni possono essere raggiunte anche impiegando materie riciclate, il cui livello qualitativo deve comunque essere assicurato con costanza (Venosta, 1995). Lo sviluppo di un mercato competitivo ed efficiente di materie plastiche riciclate è, quindi, legato a una qualificazione sia dei materiali che dei manufatti con essi ottenuti: in tal senso, la normazione può dare un notevole contributo alla valorizzazione dei residui, industriali e da post-consumo, stimolando, attraverso

un'offerta chiara e tipizzata, l'utilizzo di fonti selezionate. Per quanto riguarda i manufatti, la legislazione italiana, con le norme tecniche del citato Decreto Ministeriale del 5 Settembre 1995, ha espressamente indicato la possibilità di impiegare in diversi prodotti materiali di riciclo, tra cui quelli di origine polimerica, purché vengano assicurate le caratteristiche prestazionali richieste: diventa, quindi, necessaria la disponibilità di norme che consentano, dalla parte del riciclatore, di fornire un materiale o prodotto più appetibile e, dalla parte del trasformatore, di avere le informazioni indispensabili per un uso corretto, facile e sicuro. La presenza sul mercato di materie plastiche di riciclo certificate si pone, quindi, come condizione favorevole per l'industria trasformatrice e per l'industria riciclatrice, che in tal modo possono garantire la costanza del livello prestazionale delle proprie produzioni.
Attualmente, per quanto concerne le materie plastiche, sono in corso di elaborazione norme sia a livello europeo che a livello italiano, norme che per il momento interessano, ovviamente, quelle categorie di polimeri che sono riciclate in maggiore quantità: a livello europeo (Beretta, 1994) il CEN, Comitato Europeo di Normalizzazione, attraverso il Comitato Tecnico TC 155, si sta occupando di tubi e raccordi in PE (polietilene), PP (polipropilene) e PVC (polivinilcloruro) riciclati; a livello italiano esiste il progetto di norma 602 sulle materie plastiche di riciclo, redatto dalla Sottocommissione 25 dell'Uniplast, ente federato all'UNI (Callegaro, 1995). Il progetto di norma 602 si occupa di PE, PP, PET (polietilentereftalato), PS (polistirene) e PVC (anche di provenienza da serramenti), materiali destinati a impieghi diversi: per ogni materiale vengono individuati i possibili settori di utilizzo e vengono definite delle schede tecniche con le caratteristiche ritenute significative per ogni singolo polimero, anche in relazione alla provenienza e alla destinazione tecnologica (stampaggio a iniezione, estrusione, soffiaggio, ecc.). Inoltre, dato che per i materiali di riciclo la provenienza è spesso da post-consumo, sono allo studio metodi di analisi per la determinazione dei diversi possibili contaminanti presenti: ciò sottolinea la difficoltà che si lega a questo processo di normazione, un processo lungo e complesso, che passa attraverso la volontà e l'azione congiunta di produttori di materie plastiche, produttori di impianti di riciclo, riciclatori e trasformatori, condizione irrinunciabile, però, per il consolidarsi di un reale mercato di prodotti riciclati.

1.3.3 Le certificazioni sui prodotti: una innovazione necessaria

Lo sviluppo di un quadro normativo chiaro e definito è una condizione essenziale affinché si realizzi un utilizzo costante e qualificato di materiali riciclati: allo stesso modo, nel settore delle costruzioni, la certificazione dell'eco-compatibilità di prodotti ed edifici può rappresentare una innovazione necessaria a stimolare ricerche e sperimentazioni relative alle tecniche di riciclaggio, sollecitando tutti gli attori del processo produttivo a una maggiore considerazione per gli aspetti ambientali, nella consapevolezza della responsabilità sull'impatto ecologico dei propri prodotti. È evidente che una progettazione che consideri la componente ambientale come termine di riferimento può trovarsi nella difficoltà di determinare e misurare, in modo obbiettivo, il livello della qualità raggiunta nell'opera: sono necessari, dunque, nuovi e adeguati strumenti ai quali i progettisti possano fare riferimento, strumenti che, nell'ottica della compatibilità ambientale, partano dall'assunzione del concetto di "ciclo di vita" dell'edificio, cioè dalla analisi degli impatti sulle risorse e sull'ambiente nelle fasi di produzione, utilizzazione e smaltimento del prodotto. In relazione a questa esigenza, negli ultimi anni si sono sviluppate metodologie di valutazione e di certificazione tese ad attribuire i cosiddetti "marchi ecologici" (41), metodologie che interessano la valutazione globale dell'edificio oppure riguardano la certificazione del singolo prodotto: senza voler entrare nel merito specifico delle singole iniziative (che tra l'altro rappresentano solo una minima parte delle ricerche in atto sul tema edilizia/ambiente, vedi a esempio quelle su "indoor air quality"), è opportuno riassumerne brevemente alcuni aspetti fondamentali, soprattutto per le ricadute in senso comportamentale che esse possono o potranno avere all'interno del processo costruttivo. Nella valutazione ambientale dell'intero edificio le iniziative più note sono quelle elaborate dall'ente di ricerca inglese BRE (Building Research Establishment) (Morfini, 1993[2], pp. 303-304) e dall'Istituto danese per la ricerca in edilizia SBI (Statens Biggeforskning Institute) (Morfini, 1992, pp. 1054-1055): il metodo inglese considera, nell'attribuzione del "marchio ecologico", il livello del rapporto tra edificio e ambiente inteso in senso globale (riduzione delle emissioni di anidride carbonica e di clorofluorocarburi, corretto utilizzo del legno, riciclo dei materiali), il livello del rapporto tra edificio e ambiente circostante (modifiche sul flusso dei venti, riutilizzo dei luoghi esistenti) e il livello degli effetti sull'ambiente "indoor" (ventilazione, umidità, riduzione dell'uso di

materiali pericolosi a base di formaldeide, piombo e amianto, corretti sistemi d'illuminazione); il metodo danese, invece, considera sostanzialmente due aspetti, il consumo complessivo di energia legato alla realizzazione, gestione e demolizione dell'edificio e le emissioni gassose nocive (anidride carbonica e anidride solforosa) connesse alle diverse attività. Per quanto concerne la certificazione del singolo prodotto, invece, il Consiglio delle Comunità Europee ha emanato il Regolamento n. 880/92 (G.U. CE 1.99 dell' 11 Aprile 1992), riferito all'intera gamma di prodotti industriali esclusi quelli alimentari e farmaceutici, sulla base di varie iniziative intraprese da paesi europei ed extraeuropei (42): il regolamento comunitario, in considerazione dell'intero ciclo di vita del prodotto e ai fini dell'impatto ambientale, valuta la quantità di rifiuti prodotta, la contaminazione delle acque e dell'atmosfera, la produzione di rumori, il consumo di energia e di risorse naturali, gli effetti sugli ecosistemi. Con riferimento ai materiali da costruzione (43), merita particolare attenzione la Direttiva Comunitaria 89/106 (recepita dal Decreto del Presidente della Repubblica n. 246 del 21 Aprile 1993), che, nel contesto dei requisiti essenziali necessari per la libera circolazione nel mercato europeo (Tab. 4), oltre alla resistenza meccanica e alla stabilità, alla sicurezza in caso d'incendio, alla sicurezza nell'impiego, alla protezione contro il rumore, al risparmio energetico e ritenzione di calore, inserisce anche quello relativo a << igiene, salute, ambiente >>: tale requisito indica che l'opera deve essere costruita in modo da non provocare alcun danno alla salute (sviluppo di sostanze gassose tossiche, inquinamento dell'acqua e del suolo, difetti nello scarico delle acque luride o dei fumi, formazione di umidità sulle pareti) e contribuisce, assieme agli altri relativi alla sicurezza, all'attribuzione del marchio CE, che testimonia della conformità del prodotto alle norme europee armonizzate della direttiva di riferimento (non è, quindi, un marchio di qualità) (44) e conferisce il diritto alle libera circolazione sull'intero territorio comunitario.
Al termine di questa veloce illustrazione, ciò che è significativo sottolineare è come le iniziative e gli strumenti analizzati siano testimonianza di una tendenza innovativa nella valutazione degli edifici e dei materiali da costruzione, basata sull'uso sempre più frequente dell'analisi del ciclo di vita, tendenza che porta in se potenzialità notevoli in termini di maggiore attenzione ai problemi ambientali e che, quindi, in modo non marginale, interessa una trattazione che voglia occuparsi del riciclo di materiali in edilizia.

Tab. 4 Requisiti essenziali dei materiali da costruzione (DPR 246/93)

Si esaminano di seguito i requisiti definiti essenziali ai fini della salute e della sicurezza degli utenti e dei consumatori, con riferimento ai materiali da costruzione (Decreto del Presidente della Repubblica n. 246 del 21 Aprile 1993, art. 1, comma 1, allegato A).

1. Resistenza meccanica e stabilità

   Per soddisfare questo requisito l'opera deve essere concepita e costruita in modo da sopportare i carichi prevedibili senza dar luogo a crollo totale o parziale, deformazioni inammissibili, deterioramenti di sue parti o degli impianti fissi.

2. Sicurezza in caso d'incendio

   Per soddisfare questo requisito l'opera deve essere concepita e costruita in modo da garantire, in caso d'incendio: la stabilità degli elementi portanti per un tempo utile ad assicurare il soccorso agli occupanti; la limitata propagazione del fuoco e dei fumi, anche riguardo alle opere vicine; la possibilità per le squadre di soccorso di operare in condizioni di sicurezza.

3. Igiene, salute e ambiente

   Per soddisfare questo requisito l'opera deve essere concepita e costruita in modo da non costituire una minaccia per l'igiene o la salute degli occupanti o dei vicini, causata, in particolare, dalla formazione di gas nocivi, dalla presenza nell'aria di particelle o di gas pericolosi, dall'emissione di radiazioni pericolose, dall'inquinamento o dalla contaminazione dell'acqua o del suolo, da difetti di evacuazione delle acque, dai fumi e dai residui solidi o liquidi e dalla formazione di umidità in parti o sulle superfici interne dell'opera.

4. Sicurezza di utilizzazione

   Per soddisfare questo requisito l'opera deve essere concepita e costruita in modo tale che la sua utilizzazione o il suo funzionamento non presentino dei rischi inaccettabili di incidenti come scivolamenti, cadute, colpi, bruciature, scariche elettriche, ferimenti a seguito di esplosioni e altri prevedibili danneggiamenti alle persone che la occupano o che si trovano nelle sue prossimità.

5. Protezione contro il rumore

   Per soddisfare questo requisito l'opera deve essere concepita e costruita in modo tale che il rumore percepito dagli occupanti o da persone situate in sua prossimità sia mantenuto a livelli che non presentino minaccia per la loro salute.

6 Risparmio energetico e isolamento termico

   Per soddisfare questo requisito l'opera e i suoi impianti di raffreddamento e di aerazione devono essere concepiti e costruiti in modo tale che il consumo d'energia necessario alla loro utilizzazione sia moderato, tenuto conto delle condizioni climatiche locali e del confort termico degli occupanti.

Note di approfondimento

1. Il riferimento ai *limiti della società industriale* (Rigamonti, 1996, pp. 29-33) va inteso non tanto nel senso di una visione negativa del mondo industriale rispetto a quello pre-industriale, ma nel senso della violenta accellerazione che lo sviluppo industriale ha provocato sulle problematiche ambientali (a questo riguardo bisogna sottolineare che anche tra gli economisti neoclassici della fine del XVIII sec. esisteva la preoccupazione di un limite dello sviluppo agricolo legato all'aumentare della popolazione). Quello che il modello di sviluppo industriale pone in evidenza è il concetto di *limite* inteso come scarsità assoluta delle risorse (Meadows D. H., et alii, 1972), a fronte di una crescita ininterrotta della popolazione e della produzione industriale, mentre parte degli economisti continua a ragionare in termini di scarsità relativa delle risorse, relativa cioè alla capacità tecnologica dell'uomo di sapersene appropriare. Si tratta quindi di un limite fisico, che è strettamente correlato alla velocità dello sviluppo: la crescente e vertiginosa richiesta di materie prime provoca, come conseguenza diretta, l'impoverimento delle fonti e, come conseguenza indiretta legata al mancato ammodernamento delle tecnologie a causa dei tempi stretti dello sviluppo, l'aumento degli scarti e dell'energia necessari per l'approvvigionamento di tali materie. Parlare in termini di scarsità assoluta delle risorse significa, quindi, mettere in conto anche la limitata capacità dell'ambiente naturale verso la crescente quantità di rifiuti e inquinamento che vengono prodotti dal moderno modello di sviluppo.
2. In merito alla *storiografia ecologica* del nostro secolo, Luciano Valle (1996), filosofo ambientalista, in un suo recente intervento sulla questione della modernità ha spiegato come essa trovi radici feconde negli Stati Uniti degli anni '60 (basti citare, fra tutti, il gesuita Teilhard de Chardin), in Whithead (per il quale la scienza moderna è stata una grande scienza, però monoculare, superficiale, quantitativa e non qualitativa), all'interno della storia della scienza, all'interno della storia della filosofia (Heidegger e il sapersi muovere all'altezza della rivoluzione della tecnica, vederne i limiti e saper quindi fronteggiare la sua avanzata), all'interno dei movimenti delle idee degli epistemologi. Le posizioni della storiografia ecologica trovano negli ultimi vent'anni diversi momenti forti: le riflessioni di Gregory Bateson (la necessità di fare i conti con la grande saggezza greca e orientale, sulla ragione come cuore, come senso della unità, della proporzione, della relazione tra uomo e natura), sul piano teologico quelle di Moltmann (il moderno in Occidente perde la dimensione e il senso dello Spirito Santo, mentre una concezione corretta dello Spirito Santo avrebbe impedito di ridurre il mondo a mondo macchina, a mondo orologio e a mondo senza anima). Infine, vi sono due grandi temi, legati alla modernità, sui quali la storiografia ecologica ha lavorato poco: il tema del tempo e il tema della contemplazione. Il moderno è stato meccanicista non soltanto perché ha disanimato la natura e ha ridotto a oggetti le persone, la natura, le cose e gli altri; il moderno ha cosificato, reificato, anche il tempo, ha ridotto il tempo a tempo di prestazione, quindi tempo non più come tempo di grazia, come capacità di incantarsi di fronte al mistero di ciò che è. L'altro problema è quello della contemplazione: la contemplazione non intesa come fuga dal mondo ma come essere capaci di stare all'altezza delle cose belle e buone, ancora una volta la contemplazione come aprirsi al mistero dell'essere.
3. A riguardo del concetto di *sostenibilità*, l'evoluzione storico-culturale che ne ha caratterizzato le relazioni con il movimento ambientalista è trattata, in maniera appprofondita, da Richard C. Hill, Jan G. Bergman e Paul A. Bowen, 1994, op. cit.
4. Il *Brundtland Report* prende il nome dal suo autore, il Primo Ministro della Norvegia Gro Brundtland, che nel 1987 ha trattato, per la prima volta come presa di posizione ufficiale di un governo occidentale, il problema dello sviluppo sostenibile. Da allora questo rapporto è diventato il punto di riferimento e caposaldo di qualsiasi discussione sulle questioni ambientali.
5. La necessità di leggere il problema ambientale contemporaneo in modo propositivo è sottolineata da Jaques Lesourne il quale sostiene che la presa di coscienza della limitatezza delle risorse non fornisce "alcun filo conduttore per la lettura dei diversi avvenire in quanto essa rinvia l'umanità a se stessa, al conosci te stesso, alla realtà delle carenze di controllo" (Lesourne, 1981, tr. it. 1985, p.39).
6. La locuzione *industria delle costruzioni* identifica "sia le imprese di costruzioni, sia le industrie che producono componenti per l'edilizia, sia le industrie dell'indotto, preposte alla fornitura di prodotti e semilavorati per le costruzioni" (Campioli, 1993, p. 38). Charles J. Kibert definisce con *industria delle costruzioni* tutti gli attori che "progettano, costruiscono, alterano o mantengono l'ambiente costruito lungo il suo ciclo di vita: ricercatori, pianificatori, architetti, ingegneri, costruttori e operatori" (Kibert, 1994[1], p. 6).

7. Per quanto concerne *l'efficienza energetica* degli edifici, uno studio condotto negli Stati Uniti ha dimostrato come l'energia elettrica utilizzata per l'illuminazione, il condizionamento dell'aria e il riscaldamento degli spazi abitati, negli edifici commerciali e residenziali, produce circa il 25% delle emissioni totali di anidride carbonica, la principale causa dell'effetto serra sul nostro pianeta (Rubin, et alii, 1992). Il risparmio sul consumo di energia elettrica (stimato nel 45%) potrebbe essere ottenuto attraverso l'utilizzo di: una disposizione strategica di lucernari e finestre per massimizzare l'impiego di luce naturale; fonti luminose e resistenze ad alta efficienza; sensori che disinseriscano l'illuminazione laddove gli spazi rimangano a lungo inutilizzati; sensori che regolino la luce artificiale sulla base del livello di quella naturale; isolanti per pareti e pavimenti tre volte superiori alla media attuale; finestre con "heat mirror sheets" (lastre riflettori di calore) che impediscono l'entrata del calore estivo e l'uscita del caloreinvernale; impianti altamente efficienti di riscaldamento e raffreddamento con alimentazione a gas (Steele, 1994).
8. Il termine *riuso* (Rigamonti, 1996, pp. 132-134, nota 4), da un punto di vista strettamente analitico, non dovrebbe essere confuso con il termine *riciclo*. Il primo indica il riutilizzo di un manufatto dismesso, eventualmente previo intervento di manutenzione; il secondo, a differenza del primo, comporta la riduzione, attraverso specifici processi, dei materiali in materie prime utilizzabili in nuovi prodotti. In realtà tale distinzione risulta troppo rigida tanto da far preferire un uso intercambiabile dei due termini. Per esempio, nel caso del fumo di silice, sottoprodotto della lavorazione della ghisa, utilizzato come additivo nel calcestruzzo, si dovrebbe parlare di *riuso*, in quanto non intervengono particolari lavorazioni a modificare il materiale, mentre parrebbe più logico parlare di *riciclo*, vista l'estrema differenza tra lo scopo sotteso alla produzione e la ragione legata all'utilizzo del materiale stesso. Così come nel caso dei mattoni cotti sarebbe impossibile ricondurre il componente alle materie prime originarie, e quindi parlare di *riciclo* di tali materiali nei sottofondi stradali, a causa delle trasformazioni irreversibili che tali materie hanno subito durante la lavorazione: in questo caso, però, l'evidente trasformazione meccanica intervenuta nel processo di riutilizzo impedisce anche di parlare di *riuso*. Forse, senza però attardarsi troppo in definizioni che rimangono solo marginali rispetto al contenuto dei problemi, si potrebbe legare il termine *riuso* alla permanenza delle forme, delle funzioni e del campo di utilizzo originari del componente, e il termine *riciclo* quantomeno al cambiamento del settore d'impiego e all'utilizzo come materia prima secondaria.
9. Il riferimento al *patrimonio edilizio esistente* va inteso sia nel senso del mantenimento dell'efficienza delle condizioni tecnologiche esistenti nel costruito, sia nel senso di una azione di adeguamento degli impianti e delle strutture esistenti teso a migliorarne le prestazioni in termini energetici.
10. In merito alla *sensibilità ecologica* di committenti pubblici e privati, tale tendenza è gia evidente in alcune recenti realizzazioni innovative (Programma per l'edilizia residenziale pubblica - denominato Modell Steiermark - a Graz, Austria) dove, nel momento in cui è stata chiamata attivamente a partecipare al processo progettuale, l'utenza ha mostrato una attenzione verso i materiali e verso l'ambiente notevoli (Golinelli, 1994, p. 4).
11. Per quanto concerne la *legislazione ambientale* inerente l'edilizia, oltre a tutte le leggi, nazionali e regionali, che prevedono strumenti urbanistici di pianificazione territoriale, è importante citare la Legge 1089/39 sulla tutela delle cose d'interesse artistico e storico, la Legge 1497/39 per la protezione delle bellezze ambientali, la Legge 431/85 (legge Galasso) sulla tutela delle zone di particolare interesse ambientale, la Legge 349/86 istitutiva del Ministero dell'ambiente, il D.P.R. 616/77 di trasferimento delle funzioni inerenti le tematiche ambientali dallo stato alle regioni e di istituzione dei parchi regionali, la Legge 183/89 di difesa del suolo, la Legge quadro 394/91 sulle aree naturali protette. Tra gli strumenti atti a verificare la compatibilità ambientale dei progetti di particolari opere costruttive, la citata Legge 349/86 ha introdotto la procedura di valutazione di impatto ambientale attraverso la quale si fornisce una valutazione preventiva degli effetti che possono produrre sull'ambiente in cui vengono realizzate opere quali isediamenti industriali, grandi infrastrutture, autostrade, ferrovie, elettrodotti, oleodotti, metanodotti, bacini d'accumulo di acque, ecc.
Per quanto riguarda, invece, la legislazione antinquinamento, vanno citate la Legge 615/66 contro l'inquinamento atmosferico, la Legge 319/76 (legge Merli) sull'inquinamento delle acque, le numerose direttive CEE sull'inquinamento idrico, il D.P.R. 915/82 sullo smaltimento dei rifiuti, e il D.P.C.M. del 1.3.1991 sull'inquinamento acustico.
Infine, per quanto riguarda il contenimento dei consumi energetici per usi termici negli edifici, va citata la Legge 373/76.

12. Il termine *eco-bilancio* è utilizzato dall'Associazione dei Produttori di Materie Plastiche in Europa (APME; 1993) per indicare la valutazione di una varietà di fattori durante l'intero ciclo di vita del prodotto, dall'approvvigionamento delle materie prime alla produzione, all'uso e allo smaltimento finale; questa valutazione può comprendere elementi come lo sfruttamento delle risorse naturali, il contributo al riscaldamento della terra, o l'urgenza di trovare soluzioni per il trattamento dei rifiuti. L'ecobilancio ha delle entrate (materie prime energia), e delle uscite (i prodotti, le acque reflue, le emissioni gassose e i residui solidi) suddivise in varie fasi: l'acquisizione di materie prime; la produzione-trasformazione-formulazione; la distribuzione e il trasporto; l'uso-riuso-manutenzione; il riciclo; lo smaltimento dei rifiuti. Tale valutazione deve essere fatta in modo obbiettivo e scientifico attraverso le tecniche di "analisi del ciclo di vita" o lo studio del prodotto "dalla culla alla tomba".
13. Il termine *eco-efficienza* è quello che il Business Council for Sustainable Development (BCSD, 1993) (organismo a cui aderiscono i responsabili di alcune tra le più grandi aziende mondiali e che, tra l'altro, ha organizzato la Conferenza di Rio sull'ambiente nel 1992) ha proposto per indicare quello che dovrebbe essere l'obiettivo strategico delle imprese nel quadro della ricerca di uno sviluppo sostenibile.
14. Il concetto di *responsabilità estesa* del produttore è stato definito, in un rapporto dell'aprile 1992 del Department of Industrial Environmental Economics (Università di Lund, Svezia) al Ministero svedese dell'Ambiente e delle Risorse Naturali, come "una strategia di protezione ambientale mirata all'obiettivo della riduzione dell'impatto ambientale di un prodotto, rendendo il produttore responsabile dell'intero ciclo di vita del prodotto e in particolare del recupero, riciclo e smaltimento finale" (Lindhqvist, 1992, p.15). L'idea di un produttore responsabile del completo ciclo di vita dei prodotti che realizza non è recente e si può già rintracciare nel principio del "chi inquina paga" (PPP - "Polluter Pays Principle"), formulato nel 1972 in occasione della Conferenza mondiale sull'ambiente di Stoccolma; per avere una definizione a livello legislativo bisogna però attendere il Decreto sugli imballaggi proposto dal Ministro per l'Ambiente tedesco Klaus Toepfer nel 1990: tale decreto introduce per produttori e distributori le responsabilità relativa all'imballaggio usato, poiché ne rappresentano il punto d'origine, obbligandoli di fatto a raccogliere, secondo diverse modalità, gli imballaggi usati e dismessi.
Thomas Lindhqvist (1992) parla di tre tipi di responsabilità: la responsabilità definita "liability", che si riferisce ai danni ambientali causati da un prodotto in questione (comprese le fasi relative al suo uso e smaltimento finale); la responsabilità economica, con la quale s'intende che il produttore coprirà integralmente o parzialmente i costi di recupero, riciclaggio o smaltimento finale dei suoi prodotti (tassa); la responsabilità fisica, che significa che il produttore gestisce sia l'organizzazione che i costi dei suoi prodotti dismessi, attraverso lo sviluppo di tecnologie adeguate.
Infine, la Direttiva dell'Unione Europea 62/94, relativa agli imballaggi e rifiuti di imballaggio, ha introdotto il principio della "responsabilità condivisa", responsabilità che comprende negli obblighi previsti dalla direttiva tutte le categorie che interagiscono con il prodotto durante il suo ciclo di vita (Pinetti, 1995[4]).
15. In merito all'*analisi del ciclo di vita* di materiali e componenti, uno studio condotto dal Laboratorio di Prova della Confederazione Elvetica - EMPA (APME, 1993, p. 7) ha esaminato le "performance" di alcuni tipi di intelaiatura di finestra in legno, PVC e alluminio. Molta gente crede instintivamente che le finestre in legno siano le più economiche: lo studio conclude che non è sempre così e illustra la necessità di prendere in considerazione ogni elemento del ciclo di vita, compreso la manutenzione e i mezzi di smaltimento, e non solo la semplice produzione. Esaminando solo quest'ultima le finestre in legno richiedono il minor consumo d'energia ma, se si include lo smaltimento, la riciclabilità del PVC pone quasi alla pari i due materiali.
Circa le ricerche e le innovazione che possono essere indotte dalla considerazione dell'eco-bilancio di un materiale o componente edilizio si può sottolineare anche il caso dei laterizi (Morfini, 1993[1], p. 936): evidenziato come la richiesta di energia termica, all'interno del ciclo di produzione, sia legata, per la quasi totalità, alle fasi di cottura e di essicamento, si sono sviluppate interessanti esperienze che vedono il riempiego di fanghi da depurazione dell'industria cartaria come combustibile indiretto additivato all'argilla dei laterizi. Tali esperienze hanno avuto come risultato l'ottenimento di consistenti risparmi energetici e, contemporaneamente, di una particolare alveolatura dei cotti, derivata dalla combustione dei fanghi inclusi nell'impasto, che accentua le prestazioni energetiche coibenti del prodotto.
16. Il concetto di *adeguatezza riguardo allo scopo* deve rimanere fondamentale per il progettista: anche se le considerazioni ambientali sono tenute in sempre maggior conto, la capacità di un prodotto di soddisfare le esigenze per le quali è stato creato deve essere anch'essa valutata

prima di giungere a una conclusione sul suo impatto ambientale. Un prodotto che si classifica bene in una analisi di ecobilancio, ma che non raggiunge i suoi scopi, può essere considerato solo come uno spreco di risorse.
17. Con riferimento alla *manutenzione*, Claudio Molinari (1989) mette in rilievo, attraverso i risultati di una indagine condotta presso operatori specializzati, come gli interventi manutentivi periodici permettano di allungare di più del doppio la durata di vita di subsistemi ed elementi costruttivi: a esempio, nel caso delle partizioni verticali in muratura si passerebbe da 85 a 302 anni, nel caso dei solai in latero-cemento da 85 a 292 anni, nel caso dei serramenti esterni da 13 a 40 anni. È da sottolineare come l'allungamento del ciclo di vita di un prodotto abbia ricadute positive sul consumo di materiali e, quindi, sia una valida opzione di 'sostenibilità'.
18. In merito al *ruolo dei materiali* nell'avvicinamento tra settore edilizio e mondo industriale, Andrea Campioli sottolinea come "la necessità di riciclare una grande quantità di rifiuti edilizi, così da far fronte alla scarsità di risorse a disposizione e la necessità di una sempre più elevata manuntenibilità degli edifici, evidenzino il ruolo propulsivo che i produttori di materiali e semilavorati e le imprese rivestono nel promuovere l'organizzazione tecnologica" (Campioli, 1993, p.16).
19. Sul concetto di *vincolo* occorre sottolineare che esso "non limita semplicemente i possibili ma è anche opportunità; non si impone semplicemente dall'esterno a una realtà esistente prima di tutto, ma partecipa alla costruzione di una struttura integrata e determina all'occasione uno spettro di conseguenze intelleggibili e nuove" (Prigogine, Stengers, 1981, p. 1076).
20. In merito al *livello prestazionale* dei componenti, Claudio Molinari introduce il concetto di bi-stabilità. "Per elementi, sistemi o subsistemi bi-stabili si intendono quelli per cui è chiaramente individuato lo stato di funzionamento e quello di non funzionamento e che non presentano stati intermedi tra i due (per esempio, una lampada è accesa o è saltata; una saldatura tiene o non tiene)" (Molinari, 1989, p. 83, nota 43). Invece la grande maggioranza dei componenti edilizi accetta stati di funzionamento intermedi, legati anche a livelli prestazionali non assoluti.
21. In riferimento al *progressivo esaurimento delle possibilità estrattive*, in occasione della redazione dei Piani provinciali delle province lombarde - (Provincia di Mantova, Piano cave della provincia di Mantova, Mantova, 1986, ciclostilato) - si è evidenziato come, ai livelli attuali di consumo si stimi un sostanziale esaurimento delle risorse più comunemente impiegate nel settore edilizio (sabbia, ghiaia, argilla, cemento) entro 20-25 anni (Molinari, 1990, p.152).
22. Il termine *innovazione*, se riferito al campo delle costruzioni, sottende ogni processo in cui avvenga la sostituzione di materiali di base, semilavorati, componenti, attrezzature, tecniche, e anche procedure o modelli organizzativi (Sinopoli, 1991).
23. In riferimento alla *riduzione dei consumi* utilizzando le quantità prima scartate di materiale e alle innovazioni a essa collegate, un esempio interessante è quello relativo al cosiddetto "marmo resina", un ricomposto di marmo ottenuto partendo da granuli e frammenti di materia naturale (marmi frantumati e sabbie quarzifere), miscelati con una minima percentuale (6%) di resina poliestere, resina che ha compiti strutturali in quanto restituisce all'amalgama di residui una massa definita, con qualità fisiche e prestazionali superiori al prodotto naturale (costanza nella fornitura, peso e spessori contenuti, assenza di crepe o bolle d'aria). Il grande vantaggio di questo materiale è la facile lavorabilità: esso viene prodotto in lastre singole finite (non prodotte quindi dalla segagione del blocco, eliminando così gli sfridi di lavorazione), lastre e marmette pronte per la posa, alle quali in fase di stampaggio possono essere aggiunte, per fini tecnici e prestazionali, reti antistatiche e boccole per ancoraggio. Le lastre così ottenute sono utilizzate per pavimentazioni sopraelevate e pareti ventilate, soprattutto, per l'omogeneità e la lunga durata, in aeroporti , banche, grandi magazzini, esposizioni, alberghi e scuole. In Italia le aziende produttrici di ricomposto di marmo sono due: la Santa Margherita SpA di Volargne (VR) e la Stone Italiana srl di S. Martino Buon Albergo (VR).
24. In merito ai *percorsi dell'innovazione* nel settore delle costruzioni, Andrea Campioli (1993) riconosce tre diverse possibilità: la prima legata alla necessità di innovare per fornire una risposta adeguata a un problema fino allora irrisolto; la seconda trae origine dal trasferimento di innovazioni messe a punto in altri settori produttivi; la terza esprime l'innovazione come miglioramento di processi e prodotti già utilizzati nelle costruzioni. A tale riguardo il problema del riciclo credo vada posto nel primo dei tre percorsi, se inteso come nuova esigenza da soddisfare, oppure nel secondo, se inteso come nuovi materiali messi a disposizione dalle tecnologie di riciclaggio.
25. Il termine *mimèsi* riassume "tutte quelle espressioni architettoniche nelle quali è possibile riscontrare un occultamento dell'innovazione, sia essa riferita al materiale, alla tecnica esecutiva, piuttosto che al processo costruttivo [...] mediante il ricorso a forme che ricalcano

l'immagine, ma non la sostanza, di una cultura costruttiva consolidata ma ormai superata e anacronistica.[...]. La mimèsi costituisce il tentativo di cambiare le sembianze a un oggetto intervenendo sulla forma, sulla superficie e non sulla sostanza. Si assiste così (a esempio), nell'Ottocento, alla mimèsi della ghisa, del ferro e del cemento armato [...] formati a immagine e somiglianza del legno e della pietra" (Campioli, 1991, p. 49). Nel caso della plastica, l'intrinseca proprietà di assumere forme e immagini tra le più disparate, fa sì che il processo di mimèsi investa altri campi della produzione: si assiste allora alla nascita della 'finta pelle', del 'finto legno', della 'finta radica', del 'finto marmo', ecc. Comunque va sottolineato che se, dal lato dell'architettura, esistono forti valenze culturali che possono giustificare tale processo, negli altri campi sopraccennati ciò appare legato, piuttosto, a esigenze di carattere commerciale.
26. Il termine *muro a sacco* indica "l'opus coementicium, opera cementizia, conglomerato di ciottoli, frammenti di pietre e di mattoni legati da malta pozzolana, che costituisce il nucleo della muratura a concrezione, detta anche "a sacco", poiché il conglomerato viene racchiuso tra i due paramenti esterni (Bairati, Finocchi, 1984, p.125).
27. Il termine *attività pozzolanica* indica la capacità posseduta da alcuni materiali a base di silice e allumina allo stato amorfo di reagire, in presenza di acqua, con l'idrato di calcio dando luogo a composti che nel tempo induriscono (idrosilicati di calcio). Tale reazione sottraendo un composto solubile (l'idrato di calcio) all'azione dell'acqua evita il dilavamento di malte e cementi, processo che, se lasciato evolvere indisturbato, riduce la loro durabilità, anche a causa dell'aumento della loro porosità. La capacità pozzolanica è sostanzialmente legata a tre fattori: la composizione chimica, cioè la presenza di uno spiccato carattere acido con netta prevalenza della silice; l'instabilità termodinamica, dovuta alla presenza di composti vetrosi e instabili che rendono la roccia reattiva; l'elevata superficie specifica, in quanto aumenta la reattività della pozzolana. Esistono pozzolane di origine naturale, vulcaniche (napoletane - Pozzuoli, romane - Segni) e non vulcaniche (Terre di diatomee, pozzolane di Sacrofano); oppure sono di origine artificiale, argille e scisti (calcinate fra 500 - 900 °C con formazione di silice e allumina amorfa - cocciopesto), ceneri volanti (ottenute dalla combustione di carbone), fumo di silice (produzione acciaio siliceo). Ancora oggi si producono cementi pozzolanici aggiungendo al clinker macinato il 30% di pozzolana.
28. Le *scorie basiche*, o loppe o sabbie d'altoforno, sono scorie più leggere che affiorano dalla ganga durante la lavorazione della ghisa in altoforno, che si raffreddano velocemente mantenendo uno stato vetroso molto reattivo, e che, proprio a causa dello shock termico dovuto al raffreddamento si frantumano in polvere finissima.
29. In relazione alle *scorie basiche d'altoforno espanse*, recenti studi (Tinker, 1994) hanno dimostrato che l'utilizzo di inerti a base di tali materiali nel confezionamento di malte permette di ridurre sensibilmente la conduttività termica delle stesse proponendo, dunque, una possibile adeguata soluzione ai noti problemi di ponte termico, e di conseguente condensa, che si creano nelle murature in prossimità dei giunti. La riduzione di conduttività, inoltre, influenza solo parzialmente la resistenza a compressione delle malte: i problemi per questo tipo di applicazione sono, invece, di ordine culturale, relativamente allo scetticismo circa l'utilizzo di materiali contaminati, e di ordine chimico, per la residua reattività alcalina delle scorie.
30. Per quanto riguarda i *rifiuti da costruzione e da demolizione*, il Decreto MInisteriale del 5 Settembre 1994, definisce, al punto 8.13 delle norme tecniche allegate, tale rifiuti come << residui costituiti da laterizi, intonaci e conglomerati cementizi armato e non, purché privi di amianto >>, le cui caratteristiche sono quelle di << materiale inerte con presenza di frazioni metalliche, legno, plastica, carta e isolanti, escluso amianto >>. Le attività di recupero inerenti tali rifiuti sono: << frantumazione, macinazione, separazione delle frazioni indesiderate, separazione della frazione metallica, separazione della frazione inerte a granulometria selezionata >>. I prodotti ottenuti attraverso le attività sopracitate sono << materiale inerte a granulometria selezionata, rottami ferrosi e non ferrosi >>. Tra gli altri materiali citati nel decreto vi sono, con provenienza dalla costruzione e demolizione di edifici, i residui di fibre di vetro (punto 2.3) e gli scarti di legno (punto 10.2).
31. Per quanto concerne *i rifiuti da demolizione* occorre considerare che, "anche se l'edilizia non è accomunabile, di primo acchito, al mondo dell'usa e getta, fatto di oggetti destinati a durare poco che producono poca qualità e molti rifiuti, i materiali di scarto derivati dai processi di costruzione e demolizione costituiscono comunque almeno il 30% dei rifiuti solidi urbani. In particolare i principali materiali di scarto [...] sono quelli legati alle tecnologie inerenti la struttura: legname di scarto (25% del totale), elementi di muratura (15%), laterizi e tegole (12%). Seguono il legname lavorato (10%), gli imballaggi (10%) e, con percentuali minori, asfalto, lana di vetro, rifiuti metallici, plastica e gomma" (Morfini, 1993[1], p. 934). Secondo uno studio di Mario Bassan

e Vittorio Galimberti (1996) le quantità di calcestruzzi cementizi da demolire annualmente a scala nazionale aumenteranno progressivamente per raggiungere entro il prossimo secolo le centinaia di milioni di metri cubi (studio basato sulla stima dei consumi annuali di cemento impiegato per realizzare edifici in Italia nel periodo 1946-1993 e su alcune ipotesi di vita utile degli edifici). Recenti stime hanno portato al 50% il peso degli scarti da costruzione e demolizione sul totale dei rifiuti solidi urbani in Europa Occidentale (Morfini, 1995, p. 388).
32. In merito agli *aspetti legislativi*, l'Emilia Romagna è stata tra le prime regioni a vedere la presenza di impianti per il riciclo di rifiuti edili: il primo impianto sperimentale di riciclo dei rifiuti da demolizione come aggregato è il R.O.S.E. - Recupero Omogeneizzato Scarti Edilizia, realizzato a Castellarano (RE) (Bressi, 1994). In questo caso a far da propellente verso tale indirizzo è stato il pesante contingentamento delle attività di estrazione da cava nella regione (Morfini, 1993[1], p. 935). Per quanto concerne la legislazione comunitaria, invece, è allo studio una direttiva riguardante il riciclo e lo smaltimento dei materiali da costruzione che, per quanto è dato sapere sinora, dovrebbe concettualmente ricalcare la direttiva 94/62/CE sugli imballaggi e rifiuti da imballaggi, direttiva che ha introdotto obiettivi di recupero e riciclo ben definiti e ha confermato il concetto di corresponsabilità di tutti gli operatori nel raggiungimento degli scopi della legge (Pinetti, 1995[1]).
33. Circa il quadro delle *iniziative europee* in materia di riciclo di materiali da costruzione, in particolare si possono citare quelle danesi e tedesche. La Danimarca ha istituito nel 1971 il Ministero per la Protezione dell'Ambiente (EPA), che a sua volta nel 1987 ha creato il KGB - Gruppo coordinato per il riciclo di rifiuti edilizi (Co-ordinating Group on Recycling of Building Waste) - composto da esperti delle autorità locali, produttori di materiali da costruzione e società di ingegneria, con il compito di affiancare la pubblica amministrazione nell'azione programmatica verso il settore delle costruzioni (Hansen, 1994). In Germania la gestione degli scarti costituiti da materiale da costruzione è regolata dalla "TA Siedlungsabfall" del 1992, una guida tecnica, nata all'interno della legge sui rifiuti del 1986, che definisce quattro classi di rifiuti: i rifiuti da demolizione (Bauschutt), i rifiuti da costruzione (Baustellenabfalle), i detriti da scavo (Bodenaushub) e i detriti della costruzione di strade (Strabenaufbruch); per questi rifiuti sono fissate varie percentuali come obiettivo di riciclo. La legislazione regionale tedesca, inoltre, prevede un contributo maggiorato (100 DM/t) per le imprese qualora i rifiuti edilizi vengano conferiti in discarica senza essere stati separati (Ruch, Rentz, 1994).
34. Per quanto riguarda il *riutilizzo del materiale cementizio* derivante dalla demolizione di manufatti e frantumato in opportune pezzature e riciclato, "nonostante i numerosissimi studi e le ricerche sviluppate, si impongono profonde riflessioni critiche circa l'effettiva adozione dei prodotti di riciclaggio quali aggregati per le applicazioni strutturali: si oppongono a tale impiego da un lato le disposizioni di legge (in Italia a esempio la normativa concernente i calcestruzzi cementizi prevede unicamente l'utilizzo di materiale lapideo naturale quale componente inerte per gli impasti), dall'altro l'elevata varianza dei risultati riscontrati nelle prove sinora eseguite. Tali risultati portano infatti a concludere che il materiale riciclato sia utilizzabile solo per le applicazioni richiedenti modeste prestazioni di resistenza (sottofondi di pavimentazioni industriali e stradali)" (Bassan, Galimberti, 1996, p. 30). Nel 1992, in Belgio, è stato istituito un gruppo di lavoro con l'obiettivo di elaborare norme per l'uso di inerti riciclati nel calcestruzzo: per il momento è stata definita una "Guida alla demolizione e al riuso - DRG" (Comitato Tecnico RILEM 121 - DRG) contenente la raccomandazione RILEM sul "Calcestruzzo con inerti di riciclo" che è in discussione come possibile standard europeo (Morfini, 1995, p. 390; De Pauw, et alii, 1994).
35. In relazione agli *intonaci* esistono studi di laboratorio (Hamassaki, Sbrighi Neto, 1994) che dimostrano la validità dell'utilizzo di residui da demolizione come aggregato fine per malte. Sono stati sperimentati tre differenti tipi di aggregato riciclato partendo rispettivamente da residui contenenti blocchi in laterizio, blocchi di calcestruzzo e piastrelle di ceramica: in generale le resistenze a compressione, il carico di rottura per trazione, la ritenzione d'acqua e il ritiro per essicamento sono comparabili con quelle di una malta ottenuta con aggregato naturale (non sono state effettuate valutazioni sulla capacità pozzolanica che le piastrelle in ceramica e i laterizi possono garantire). Occorre sottolineare che i risultati ottenuti si riferiscono a esperimenti di laboratorio, dove le condizioni sono perfettamente controllate e l'affidabilità degli operatori è elevata: questo fa supporre che in condizioni di esercizio in cantiere le prestazioni potrebbero essere inferiori, tanto da far propendere all'uso di aggregati riciclati solo per applicazioni non strutturali.
36. In riferimento al *sughero e al polistirene espanso*, un interessante studio del LNEC (Santos, 1994) di Lisbona - Laboratorio Nazionale per l'Ingegneria Civile - ha confrontato le possibilità di

riciclo di tre prodotti isolanti: il sughero, il polistirene espanso, il calcestruzzo aerato autoclavato (calcestruzzo ottenuto utilizzando agenti schiumogeni). Questi tre materiali sono stati impiegati come isolamento interposto in una parete a intercapedine, con risultati positivi.
37. confronta nota 11 sulla legislazione settoriale antinquinamento.
38. In merito alla *normativa specifica* relativa alle materie plastiche vanno ricordate, oltre alla citata Legge 475/88, le norme sui sacchetti di plastica, contenute nel Decreto del Ministero delle Finanze del 3 Gennaio 1989, tese a disincentivarne la produzione attraverso l'imposizione della tassa di fabbricazione, il Decreto del Ministro dell'Ambiente del 28 Giugno 1989 con le norme sull'etichettatura degli imballaggi e dei contenitori per liquidi, il Decreto del Ministro dell'Ambiente del 23 Gennaio 1991 sull'istituzione del contributo di riciclaggio sui contenitori in plastica per liquidi e, infine, le norme sul polietilene vergine destinato alla produzione di film, contenute nell'art. 29 della Legge 427/93.
39. A riguardo delle *esperienze legislative internazionali*, la legislazione tedesca è quella che appare fortemente orientata in direzione del riciclo: l'ordinanza federale sugli imballaggi e rifiuti da imballaggio del 12 Giugno 1991, nota come Decreto Toepfer, rigetta, infatti, ogni forma di trattamento che sia diversa dal riciclo (a meno che vengano superati gli obiettivi minimi di riciclo) e, inoltre, stabilisce l'assunzione di responsabilità pressoché assoluta dell'industria in ordine alla gestione dei rifiuti da imballaggio. Anche nella legislazione francese, a seguito del Decreto 94/609 relativo ai rifiuti, viene attribuita all'industria la responsabilità del recupero dei rifiuti da essa prodotti. La legislazione francese non pone alcun pregiudizio in ordine alla metodologia seguita nel trattamento dei rifiuti, ma specifica l'importanza del concetto di valorizzazione del bene dismesso. In Olanda, invece, si assiste al patto tra operatori economici del settore imballaggio e Governo per minimizzare l'impatto ambientale dei loro prodotti (riduzione di peso, omomaterialità, "refilling").
40. In riferimento ai *flussi di materie riciclate*, non poche polemiche ha suscitato l'importazione nel nostro paese di migliaia di tonnellate di rifiuti plastici dalla Germania, dove a una efficiente legislazione in materia di recupero si affianca la carenza di impianti per il trattamento di materiali di riciclo.
41. In merito alla definizione di *marchio ecologico*, in linea generale i marchi che vengono normalmente apposti ai prodotti possono essere distiniti in marchi di impresa e marchi informativi: i primi costituiscono il principale segno distintivo dell'azienda (regolamentati dalla legislazione speciale sui brevetti - R.D. 929 del 21 Giugno 1942); i secondi descrivono l'aspetto, il contenuto e le modalità di utilizzazione del prodotto. Esistono, poi, marchi che non costituiscono il risultato di un processo di certificazione, mentre altri lo sono: tra i primi vi sono i marchi "passivi", che indicano gli inconvenienti di un certo prodotto, e le autocertificazioni del produttore; tra i secondi, che presuppongono l'intervento di un Ente terzo esterno, vi sono i marchi di qualità e di sicurezza. In questo senso, il marchio ecologico può essere definito un marchio informativo certificato (Paiella, 1992-93, pp. 33-38).
42. In relazione alle *iniziative di certificazione ecologica*, si possono citare quelle tedesca, francese, scandinava, giapponese, statunitense e canadese. Il più noto tra i "marchi ecologici" è l'Angelo Azzurro, introdotto in Germania nel 1977 dal Ministero per la protezione ambientale e successivamente approvato dalle Nazioni Unite; questo marchio è rilasciato dal RAL (Istituto tedesco per l'assicurazione di qualità e l'etichettatura) ai prodotti che, comparati con prodotti analoghi, hanno il minor impatto ambientale, senza però essere meno completi o sicuri. Tra le categorie di prodotti che hanno ricevuto il marchio RAL, quelle riferite all'edilizia sono principalmente: materiali per copertura senza amianto, vernici a bassa quantità di inquinanti, vernici in polvere, rubinetteria a comando elettrico per il risparmio d'acqua, carta da parati in carta riciclata, prodotti per il trattamento del legno senza formaldeide, bruciatori e caldaie a olio combustibile, bruciatori a gas a bassa emissione e a risparmio energetico, materiali edili a base di vetro riciclato, finestre isolanti, materiali edili con gesso riciclato (Morfini, 1993[2], p. 302). Sull'esperienza e sui criteri del sistema tedesco, il Consiglio dei Ministri dei Paesi Nordici nel 1989 ha sottoscritto l'avvio di un programma armonizzato di etichettatura ecologica, mentre il governo francese ha varato nel 1991 il Comitato per il Marchio NF-Environnement. In Giappone nel 1988 è stato avviato il Progetto Promozione dei Prodotti Ecologici o EcoMark, il quale consente di sottoporre alla valutazione dei Comitati non solo i beni di consumo ma anche i servizi. Tra i prodotti etichettati i maggiori riconoscimenti sono andati ai prodotti spray non contenenti CFC, ai filtri per lavandino da cucina, agli imballaggi di carta riciclata, mentre, per quanto riguarda i materiali da costruzione, hanno ottenuto l'etichetta ecologica isolanti termici per l'edilizia, materiali per l'isolamento acustico e vibrazionale, cementi prodotti con scorie d'altoforno. Negli Stati Uniti, dal 1984 la Green Cross Certification Company, organizzazione di

certificazione scientifica indipendente, si occupa di etichettatura ecologica con particolare enfasi al materiale riciclato contenuto (perché negli USA esiste l'assolutà priorità al problema rifiuti). In particolare questa iniziativa è interessante per alcuni vincoli imposti: per esempio, la quantità di materiale riciclato, che per minori prestazioni viene impiegata in più in un dato prodotto, non può essere maggiore del 20% della quantità di materia vergine usualmente impiegata; oppure, il materiale riciclato deve provenire da post-consumo (min. 10% in peso) o da rifiuti industriali e non da scarti di produzione, che vanno riutilizzati nel normale ciclo di produzione; oppure ancora, i materiali utilizzati devono essere riciclabili almeno per l'80%. Sinora i prodotti certificati appartengono al settore degli imballaggi: l'unico materiale da costruzione certificato è una piastrella di legno naturale. In Canada nel 1988 è stato avviato il Programma Environmental Choice per aiutare i consumatori a reperire sul mercato i prodotti che abbiano un ridotto impatto ambientale. Tale certificazione ha visto prevalere prodotti costituiti da materiale recuperato e riciclato (carta, plastica, legno, olio) come prodotti cartacei a base di carta riciclata e vernici a base di acqua. Tra i materiali da costruzione certificati vi sono i materiali isolanti a base di fibre di cellulosa di legno riciclato, vernici a base di solventi non inquinanti, vernici a base d'acqua. Questo programma è particolarmente interessante perché tra i materiali da costruzione considerati rientrano quelli contenenti plastica riciclata: hanno diritto a ricevere l'eco-logo materiali da costruzione come recinzioni o tavole di copertura, prodotti orticoli, come vasi da fiori, sostegni per piante, recipienti per prodotti agricoli, attrezzi per il tempo libero e arredi da giardino, tutti però contenenti più del 60 % in peso di plastica riciclata (Paiella, 1992-93, pp. 39-117).
43. La dizione *materiali da costruzione* è intesa dalla Direttiva 89/106 come insieme dei prodotti fabbricati al fine di essere permanentemente incorporati in opere di costruzione, le quali comprendono gli edifici e le opere di ingegneria civile (AA.VV., 1995[1], pp. 336-348).
44. Il concetto di *norma armonizzata* si riferisce alle norme o parti di norme che danno forma applicativa concreta a tutti i requisiti tecnici di prodotto correlati a quelli essenziali della direttiva di riferimento. Le norme così stabilite devono essere espresse il più possibile in termini di requisiti prestazionali di prodotto. (AA.VV., 1995[1], p. 347).

Capitolo 2
LE MATERIE PLASTICHE

In questo capitolo si prendono in esame le caratteristiche chimiche, fisiche e meccaniche delle materie plastiche vergini, caratteristiche che sono essenziali per affrontare la progettazione di manufatti con questi materiali. Pur non intendendo considerare in modo dettagliato l'insieme delle composizioni chimiche e delle strutture molecolari che interessano il vasto campo delle materie plastiche, si ritiene che una conoscenza, per quanto sommaria, delle proprietà e delle famiglie dei polimeri sia indispensabile per la comprensione del comportamento e delle peculiarità di questi materiali (1), specialmente se considerati dal punto di vista del comportamento meccanico, comportamento che, in prima istanza, interessa la previsione delle condizioni d'impiego di un manufatto. Tale conoscenza passa attraverso la definizione di diversi livelli, via via sempre più specifici: il primo livello riguarda l'organizzazione spaziale delle molecole che compongono le diverse famiglie di materie plastiche in produzione e distingue principalmente i materiali termoplastici da quelli termoindurenti (Par. 2.1); il secondo livello considera le proprietà fisiche e meccaniche dei polimeri e le loro proprietà applicative (Par. 2.2); il terzo livello, infine, è quello che, da un punto di vista progettuale, risulta più interessante in quanto definisce le proprietà della materia plastica in esercizio sotto forma di manufatto e riguarda, quindi, sotto il profilo delle sollecitazioni, quel che ne concerne il comportamento visco-elastico (Par. 2.3) e, sotto il profilo termico, quel che ne concerne il comportamento al fuoco (Par. 2.4). Viste le finalità specifiche di questo lavoro, la conoscenza dei materiali polimerici interessa anche gli aspetti applicativi di tali materiali nel settore delle costruzioni: è opportuno, dunque, completare il quadro conoscitivo con l'analisi di quelli che, attualmente, sono i principali esempi di

utilizzo di materie plastiche in edilizia, sia a livello impiantistico che a livello componentistico (Par 2.5).

2.1 Definizione di materia plastica

La definizione applicativa, la definizione chimico strutturale - I polimeri termoplastici, gli elastomeri, i polimeri termoindurenti - La struttura cristallina, la struttura amorfa, le caratteristiche in funzione della cristallinità - Le combinazioni di termoplasti, gli omopolimeri, i copolimeri, le catene ramificate, le leghe e le miscele - I settori di produzione, i polimeri di massa, i tecnopolimeri, i materiali fibro-rinforzati.

Con il termine "materia plastica" si comprende una vasta gamma di prodotti di sintesi, quindi non naturali, dell'industria petrolchimica, ottenuti da materie prime quali il petrolio, il metano e il carbone: in generale, si fa risalire all'anno 1906 la scoperta della prima materia plastica, la resina fenolica nota come bakelite (dal nome dello scienziato al quale si deve tale scoperta, il Prof. Leo Hendrik Baecheland), anche se per lo sviluppo di una vera e propria industria delle materie plastiche bisogna attendere la fine della seconda guerra mondiale. La continua evoluzione avvenuta in questo campo, soprattutto negli ultimi anni, ha portato una proliferazione di tipi di polimeri con caratteristiche e applicazioni molto diverse tra loro: dal momento che tali caratteristiche differiscono notevolmente in rapporto anche a piccole variazioni di composizione, diventa difficile, per lo scopo di questa trattazione, definire e classificare il gran numero di sigle e nomi commerciali che le contraddistinguono, se non attraverso la considerazione dei loro aspetti applicativi, cioè della attitudine alla formabilità, e dei loro aspetti chimico-strutturali (Bertacchi, 1980, p. 3-5). La definizione applicativa, dunque, considera come materie plastiche quei materiali suscettibili di essere trasformati mediante opportuni processi di formatura (2), per effetto del rammolimmento sotto l'azione termica, processi che possono ripetersi una sola volta nel caso dei materiali termoindurenti e, potenzialmente, più volte nei materiali termoplastici.
La definizione chimico-strutturale (3), invece, è quella che identifica le materie plastiche con il termine "polimeri", sostanze macro-molecolari di grandi dimensioni e peso molecolare, derivate dalla concatenazione (o polimerizzazione) di più unità ripetute (4), dette "monomeri", catene che possono presentarsi allo stato amorfo o cristallino, oppure possono essere il risultato dell'unione di più monomeri a formare dei copolimeri.

2.1.1 Materie termoplastiche e termoindurenti

Tra le più comuni classificazioni dei polimeri vi è quella che considera il profilo del loro comportamento tecnologico e che distingue i polimeri termoplastici da quelli termoindurenti (GE Plastics, 1994, p. 10).
I polimeri termoplastici (5) sono costituiti da resine che possono essere ripetutamente rese plastiche, e quindi termoformate, per riscaldamento e indurite per raffreddamento, in un livello di valori di temperatura che è caratteristico della resina specifica. Dal punto di vista della struttura molecolare questi polimeri sono formati da catene indipendenti intrecciate tra loro, generalmente lineari, catene che possono contenere fino a 10^6 atomi (Fig. 1).
Sottoposte a riscaldamento, queste catene scivolano una sull'altra permettendo lo scorrimento plastico, cioè la modificazione della forma del materiale, per poi fissarsi nuovamente una volta raffreddate. Questo processo è reversibile e può, in linea di principio, essere ripetuto molte volte, anche se esiste comunque un limite al numero di questi cicli, legato al degrado delle catene molecolari durante i trattamenti termici. Una categoria particolare di termoplasti è quella degli elastomeri, categoria che nelle classificazioni viene molte volte considerata a parte: gli elastomeri termoplastici sono caratterizzati da catene molecolari lineari simili a quelle dei termoplasti semplici, tra le quali però si instaurano delle reticolazioni (legami), a maglia larga, cioè molto distanziate tra loro; ciò fa si che gli elastomeri abbiano generalmente bassi moduli elastici e possano essere ripetutamente allungati a temperatura ambiente fino al doppio della loro lunghezza originaria, per riacquistare le dimensioni di partenza una volta cessata la sollecitazione, senza che i legami, molto flessibili, tra le macromolecole si rompano degenerando il polimero (Fig. 2).
I polimeri termoindurenti (6) sono, invece, costituiti da resine che, una volta sottoposte a polimerizzazione, per riscaldamento o altro mezzo, divengono definitivamente infusibili. Questa irreversibilità è legata alla creazione, durante il processo termico, di reticolazioni, ossia legami atomici incrociati tra molecole di catene adiacenti, con formazione di strutture tridimensionali rigide (Fig. 3).
Sono questi legami atomici incrociati che impediscono, dopo raffreddamento, lo scorrimento delle singole catene molecolari e,

quindi, lo scorrimento plastico durante una successiva applicazione di calore.
Da un punto di vista tecnologico i polimeri termoindurenti sono lavorabili, una volta termoformati, solo meccanicamente, caratteristica che ne limita fortemente, rispetto ai polimeri termoplastici, la riciclabilità.

2.1.2 Polimeri termoplastici cristallini e amorfi

All'interno della classe dei polimeri termoplastici è possibile distinguere due ulteriori strutture, legate alla disposizione delle catene molecolari nello spazio: la struttura cristallina e quella amorfa (Fig. 4). Nella struttura cristallina le catene macromolecolari assumono, quando il polimero fuso si solidifica, una posizione ordinata, definendo dei cristalliti (7): questa struttura, che non interessa tutto il polimero ma solo alcune parti, determina una più elevata rigidità e tenacità del materiale, accompagnata da una resistenza agli urti più contenuta (comportamento simile al vetro). Nella struttura amorfa, invece, le catene macromolecolari risultano raggomitolate in modo disordinato, struttura che conferisce loro un comportamento duttile.
In sintesi, i polimeri cristallini o semicristallini presentano dal punto di vista meccanico, rispetto a quelli amorfi (GE Plastics, 1994, p.13):

- maggiore peso specifico;
- maggiore resistenza a trazione;
- maggiore modulo elastico a trazione;
- minor viscosità;
- maggiore ritiro e distorsione;
- minore allungamento a rottura.

2.1.3 Copolimeri e leghe

Per variare le proprietà dei materiali plastici, ottenendo particolari prestazioni, è possibile effettuare diversi tipi di combinazioni di termoplasti, sia a livello intramolecolare, ottenendo così dei copolimeri, sia a livello intermolecolare, ottenendo così leghe o miscele: la condizione necessaria per effettuare tali combinazioni è che i monomeri costituenti le diverse catene molecolari o i diversi polimeri siano tra loro compatibili. Per quanto concerne il primo livello di combinazione si possono distinguere:

- i polimeri che possiedono un solo tipo di unità ricorrente (monomero) che vengono definiti omopolimeri (Fig. 5.a1);
- i polimeri che contengono due o più tipi di unità ricorrenti (monomeri), che vengono definiti copolimeri; in questo caso il monomero ricorrente può presentarsi casualmente, in blocchi o in modo alternato, disposizioni da cui derivano i termini copolimero "random", copolimero a blocchi e copolimero alternato (Fig. 5.a2, 5.a3, 5.a4,);
- i polimeri che presentano catene molecolari ramificate e che si dividono in omopolimeri ramificati, se caratterizzati da una singola unità monomerica, oppure copolimeri a innesto, nel caso che alla catena principale vengano aggiunte catene laterali di monomeri diversi (Fig. 5.b1, 5.b2).

Per quanto concerne, invece, il secondo livello di combinazione, pur non esistendo in letteratura una definizione univoca delle leghe, esse possono essere considerate un'insieme di polimeri i quali, anziché essere collegati chimicamente, sono uniti fisicamente con l'ausilio di sostanze compatibilizzanti. Le leghe sono studiate per unire le prestazioni ottimali di ciascun costituente, che altrimenti non potrebbero essere integrate in un solo polimero, adattandole così alle più svariate esigenze dell'industria, oppure per compensarne le caratteristiche più deboli, come, per esempio, la resistenza all'urto o la resilienza a freddo quando si aggiungono dei polimeri elastici.

2.1.4 Polimeri di massa, tecnopolimeri, polimeri speciali e materiali compositi

Oltre alle classificazioni precedenti, la produzione e il consumo di materie plastiche possono essere suddivisi per tipi di applicazione, ottenendo così una divisione dei polimeri in tre grandi settori, di massa, tecnici e speciali (Saechtling, 1993, pp. 23-24), più una particolare categoria che si è venuta proponendo in maniera consistente negli ultimi anni, quella dei compositi polimerici.

I polimeri cosiddetti di massa rappresentano circa l'80% della produzione e del consumo totale di materie plastiche, e sono costituiti dalla vasta base dei materiali termoplastici e termoindurenti, comprese le loro modificazioni, copolimeri e miscele (8): questi polimeri sono impiegati in applicazioni che non richiedono particolari prestazioni e che, soprattutto, esaltano le loro doti di leggerezza, formabilità ed economicità.

Al settore successivo appartengono le cosiddette "engineering plastics" o tecnopolimeri (9) che rappresentano circa il 20% della produzione e consumo totale di materie plastiche, percentuale che è destinata ad aumentare in misura notevole per gli elevati sviluppi che questa categoria di polimeri garantisce. Frutto della progettazione mirata a migliorare specifiche qualità dei polimeri, questi materiali garantiscono vantaggi prestazionali e possibilità applicative del tutto nuove, soprattutto per le elevate qualità meccaniche, ottiche, termiche ed elettriche che essi possono garantire.
In particolare tra i vantaggi applicativi si possono citare (GE Plastics, 1990[1], p. 1):

- l'integrazione di parti e di funzioni;
- l'incorporazione di sistemi di montaggio;
- l'eliminazione della verniciatura e di altre operazioni di finitura;
- l'elevato rapporto resistenza meccanica/peso;
- l'inerzia chimica;
- la resistenza all'urto.

Un ulteriore passo in avanti nella ricerca e nella sperimentazione sui polimeri è quello che ha portato alla sintesi dei polimeri speciali (Binetti, et alii, 1988), caratterizzati soprattutto da una elevatissima resistenza termica, tale da poter realizzare con questi materiali anche organi di funzionamento meccanico, come quelli di un motore, sottoposti a elevate sollecitazioni e attriti.
La ricerca di sempre migliori prestazioni nell'utilizzo delle materie plastiche ha portato, inoltre, a sperimentare l'aggiunta di materiali solidi di origine non polimerica (rinforzi) nelle miscele di polimeri (Saechtling, 1993, p. 7-8): è il caso dei compositi polimerici dove si trovano sciolte nella matrice polimerica, cioè nella massa fluida di un polimero termoplastico o termoindurente, fibre di varia provenienza (10) che, opportunamente orientate e conformate (granuli, fibre, placchette, nastri continui), contribuiscono a elevare notevolmente le prestazioni meccaniche della matrice. Un caso particolare di compositi polimerici sono i materiali compositi sviluppati inizialmente nell'industria aerospaziale e automobilistica: questi materiali rinforzati con fibre di vetro, o con fibre ancora più resistenti, sono, a parità di peso, 3-5 volte più resistenti dell'acciaio (Fig. 6).

2.2 Le proprietà delle materie plastiche

Le proprietà meccaniche, gli intervalli di valori, l'intensità e la durata del carico, la densità, la resistenza all'urto, la resistenza a fatica e all'usura, il modulo elastico, le proprietà elettriche, le proprietà termiche, il potere isolante, il coefficiente di dilatazione, la temperatura di transizione vetrosa, le proprietà ottiche, la compatibilità chimica, i meccanismi di attacco, le condizioni ambientali - I rinforzi, le cariche, gli additivi autoestinguenti, gli stabilizzanti, gli antiossidanti, gli antistatici, gli agenti scivolanti ed espandenti.

Le materie plastiche si sono imposte negli ultimi cinquanta anni nella realizzazione dei più svariati manufatti, diventando per eccellenza un materiale di sostituzione di altri più tradizionali, a partire dal legno fino all'acciaio. Questa versatilità è legata alle caratteristiche intrinseche di questi materiali, caratteristiche che, in modo molto sintetico e schematico, possono essere così riassunte:

- proprietà meccaniche (Tab. 5);
- proprietà elettriche;
- proprietà termiche (Tab. 6);
- proprietà ottiche;
- compatibilità chimica e resistenza agli agenti atmosferici.

Riguardo al comportamento meccanico (Par. 2.3), in via generale, le materie plastiche possiedono un intervallo di resistenza meccanica e rigidità molto ampio, con moduli elastici bassi se riferiti ai metalli, se non nel caso dei polimeri fibro-rinforzati (Fig. 7 e Fig. 8): questo è dovuto alla struttura meno compatta e ai legami meno forti delle catene molecolari plastiche rispetto a quelle metalliche. In particolare il comportamento meccanico dei polimeri è fortemente influenzato dall'intensità e dalla durata di applicazione del carico (Par. 2.3.2) e dalla temperatura alla quale avviene la sollecitazione (Par. 2.3.3). Occorre sottolineare che le caratteristiche meccaniche delle materie plastiche se riferite alla densità, essendo questa molto bassa (da 0.8 a 2.2 g/cm^3), sono per lo più migliori di quelle dei materiali comparabili (vetro, carta, metalli, legno) (Gordon, 1991, p. 51). Nei polimeri è, invece, molto alta la resistenza all'urto, cioè la capacità dei materiali di assorbire energia cinetica senza rompersi (capacità che comunque è influenzata dalla struttura amorfa o cristallina, oltre che dallo spessore, dalla forma e dalle dimensioni del manufatto). La resistenza a fatica, cioè all'applicazione di sollecitazioni cicliche su un materiale (per esempio nei giunti a scatto), e la resistenza all'usura, cioè all'attrito meccanico, vanno, invece, definite sperimentalmente in quanto fortemente condizionate, insieme alla temperatura, dalle dimensioni e dal profilo del manufatto: in generale, si può comunque affermare che i

materiali plastici risultano meno deformati in condizione di sollecitazione intermittente o alternativa, rispetto alla sollecitazione costante (Hoechst, 1979[1]).
Per quanto riguarda le proprietà elettriche, le materie plastiche possono garantire, in generale, un buon isolamento e una buona protezione, proprietà per le quali sono spesso utilizzate per componenti elettrici ed elettronici (interruttori, guaine, circuiti, ecc.).
Per quanto concerne le proprietà termiche, la conducibilità termica delle materie plastiche è molto bassa, soprattutto nei materiali espansi, che sono, infatti, ottimi isolanti, utilizzati anche in edilizia (Tab 7). Rispetto agli altri materiali solitamente utilizzati il coefficiente di dilatazione termica a, rapporto tra la variazione di lunghezza e la variazione unitaria di temperatura ($°C^{-1}$), è più elevato (Tab. 8): tale coefficiente risente del comportamento anisotropo dei materiali plastici, in special modo di quelli caricati, per cui può risultare sensibilmente diverso a seconda della direzione di misurazione e del tipo di lavorazione alla quale viene sottoposto il materiale; in prima approssimazione si può affermare che a diminuisce con l'aumentare del modulo di elasticità (Fig. 9).
Nei polimeri termoplastici esiste una temperatura, detta di transizione vetrosa (Tg), in corrispondenza della quale si verifica un cambiamento significativo delle proprietà: normalmente, sotto tale temperatura il materiale sottoposto a sollecitazione si comporta in maniera rigida, al di sopra, invece, diventa più duttile (Fig. 10).
In merito alle proprietà ottiche, possono diventare importanti quando accanto alla trasparenza si associa la tenacità e la leggerezza del materiale: non a caso materiali che presentano queste tre caratteristiche, come i policarbonati o il plexiglas, vengano oramai abitualmente impiegati anche in sostituzione del vetro e per coperture trasparenti di grande estensione (serre, esposizioni, ecc.) (Maffei, Marchetti, 1995[2]; 1995[3]).
La compatibilità chimica e, in genere, l'inerzia chimica che caratterizza le materie plastiche, permettono impieghi ottimali di questi materiali anche in ambienti aggressivi; esistono comunque dei meccanismi di aggressione da parte di agenti chimici sulle materie plastiche che è opportuno tener presente.
Tali meccanismi sono (GE Plastics, 1994, pp. 40-43):

- reazione, cioè l'attacco delle sostanze chimiche aggressive alle catene polimeriche, con progressiva riduzione del peso molecolare e variazione delle resistenze meccaniche;
- solvatazione, in quanto quasi tutti i termoplastici hanno un coefficiente di solubilità specifico e tendono a solubilizzare agenti

chimici esterni con conseguente rigonfiamento, variazione dimensionale, perdita di proprietà;

- plastificazione, ovvero miscelazione di sostanze chimiche nei polimeri con diminuzione di resistenza meccanica, rigidità e resistenza alla viscosità ("creep");
- comportamento allo "stress"/"stress cracking" ambientale, cioè azione combinata di agenti aggressivi e sollecitazione che portano a fenomeni di rottura, attraverso microfessurazioni che diventano i presupposti per la penetrazione delle sostanze chimiche reagenti e, quindi, della degradazione del polimero.

Inoltre, sulle caratteristiche prestazionali dei polimeri possono influire negativamente le condizioni ambientali (Hoechst, 1986, p. 11), in particolare l'esposizione agli agenti atmosferici e alle radiazioni ultraviolette (il cosiddetto "sfarinamento", che rende la superficie grigia-opaca). L'invecchiamento causato da questi agenti, per l'azione combinata di temperatura, ossigeno, umidità relativa e raggi U.V., porta alla degradazione del polimero e alla totale perdita delle proprietà di base e del colore .

Tab. 5 Caratteristiche meccaniche dei principali materiali polimerici
Si esaminano di seguito le caratteristiche meccaniche dei principali materiali polimerici, rilevati con misure di breve durata a temperatura ambiente; in particolare sono indicate la resistenza a flessione in N/mm^2 (1), la resistenza all'urto in kJ/m^2 (2), la resilienza in kJ/m^2 (3), la resistenza a trazione in N/mm^2 (4), l'allungamento a rottura in % (5) e il modulo elastico in N/mm^2 (6) (Saechtling, 1993, pp. 526-527).

Polimero	1	2	3	4	5	6
Resine epossidiche EP rinf. fibre lunghe	140	15	15		non rilev.	13000
Copolimeri acetalici POM	110		9	68	>25	3000
Poliammide 6 PA6 con 25% FV	130	40	17	100	7	5000
Policarbonato PC	>95		30	65	80	2300
Policarbonato PC con 35% FV	210	50	15	100	3	9500
Resina poliestere UP - 1140	110	8-20	2	50	>2	3500
Polietilene a bassa densità LDPE	7-10			8-10	600	250
Polietilene ad alta densità HDPE	30-40		5	20-30	400 - 800	1000
Polimetilmetacrilato PMMA	140	12	2	80	5.5	3000
Polifenilossido PPO	90-100		>15	50-60	50	2400
Polifenilossido PPO con 30% FV	137		8-10	120	2-3	9000
Polipropilene PP	40-50		3-15	30-40	>600	800 - 1300
Polistirene PS	100	16	2	50	3	3300
Stirene/butadiene antiurto S/B	40-80	65	6-13	25-40	25-60	1800 - 2500
Acrilonitrile/ butadiene/stirene ABS	55-90	70	6-20	35-52	15-30	2000 - 2800
Polivinilcloruro PVC	70-110		2-5	50	20-50	3000
Polivinildenfluoruro PVDF	55		100 - 200	40-60	50-150	2000

Tab. 6 Caratteristiche termiche dei principali materiali polimerici

Si esaminano di seguito le caratteristiche termiche dei principali materiali polimerici; in particolare sono indicati il coefficiente di dilatazione termica a 20-50 °C x 10^{-6} x K^{-1} (1), la conducibilità termica W/mK (2), il calore specifico in kJ/kg x K (3), la stabilità dimensionale a caldo in °C secondo il metodo Vicat (4), il limite di temperatura per impieghi brevi °C (5) e il limite di temperatura per impieghi lunghi °C (6) (Saechtling, 1993, p. 517).

Polimero	1	2	3	4	5	6
Resine epossidiche EP rinf. fibre lunghe	20	0.23	0.8		180	130
Copolimeri acetalici POM	100	0.3	1.4	160	140	100
Poliammide 6 PA6 con 25% FV	30	0.23	1.4	>200	200	<130
Policarbonato PC	60-70	0.21	1.2	150	160	135
Resina poliestere UP - 1140	60-80					140
Polietilene a bassa densità LDPE	200	0.32	2.1	40	90	75
Polietilene ad alta densità HDPE	150	0.4	1.8	65	110	95
Polimetilmetacrilato PMMA	70-80	0.18	1.5	125	100	90
Polifenilossido PPO	60-70	0.23	1.4	150	150	80
Polipropilene PP	110 - 170	0.22	1.7	80-90	140	100
Polistirene PS	70	.16	1.3	88	<80	<70
Stirene/butadiene antiurto S/B	70	0.18	1.3	75	70	60
Acrilonitrile/ butadiene/stirene ABS	80	0.18	1.5	90-100	<100	<85
Polivinilcloruro PVC	70-80	0.16	0.9	70-80	75	65

Tab. 7 Valori di conducibilità termica per materiali comuni
Si evidenziano i valori di conducibilità termica di alcuni tra i materiali più comuni e delle principali famiglie di materie plastiche (GE Plastics, 1994, p. 35).

Materiale	**Conducibilità termica (W/mk) 23°C**
Acciaio	45.35
Acqua 60 °C	0.652
Alluminio	244.99
Aria	0.024
Nylon	0.260
Policarbonato PC	0.21
Polipropilene PP	0.22
Polifenilossido PPO	0.23
Poliestere UP	0.6
Polietereimmide PEI	0.22
Polistirene PS	0.16
Rame	403.26
Vetro	0.340-1.038

Tab. 8 Coefficienti di dilatazione termica lineare
Si evidenziano i coefficienti di dilatazione termica lineare di alcuni tra i materiali più comuni e delle principali famiglie di materie plastiche (GE Plastics, 1994, p. 33).

Materiale	**Coefficiente dilat. termica °C^{-1} x 10^{-6} x K^{-1}**
Acciaio	11
Alluminio	23
Cemento	14
Nylon	99
Ottone	18
Pino	5
Policarbonato PC	70
Polietilene PE	169
Polipropilene PP	22
Polifenilossido PPO	110-170
Poliestere UP	60-80
Polietereimmide PEI	62
Rame	16
Resine acetaliche POM	100
Resine acriliche	68
Vetro temperato	3
Zinco	39

2.2.1 Additivi, rinforzi e cariche

Gli additivi, le cariche e i rinforzi vengono utilizzati per modificare le proprietà fisiche e meccaniche dei polimeri. Le fibre di rinforzo (vetro, boro, carbonio, kevlar, ecc.), come detto in precedenza, sono utilizzate per migliorare le caratteristiche meccaniche, mentre per accrescere i valori di modulo elastico si utilizzano le cariche (cellulosa, farina di legno, farina minerale, carbonato di calcio, talco, sferette di vetro) e, al contrario, per diminuirli e aumentare la flessibilità si utilizzano i plastificanti, che sono per lo più prodotti a basso peso molecolare e viscosi che si vanno a interporre tra le catene polimeriche aumentandone la resistenza agli urti (Fig. 11). Gli additivi possono essere usati per proprietà quali l'autoestinguenza (idrossido di alluminio e prodotti che liberano cloro, bromo, fosforo), la stabilità alla luce ultravioletta (nerofumo),

la resistenza all'ossidazione e per impedire danneggiamenti termici durante la trasformazione. Per diminuire la resistenza superficiale delle materie plastiche, in modo da impedire il deposito di polveri per carica elettrica, si utilizzano gli agenti antistatici (nerofumo speciale, fibre di carbonio, fibre metalliche). Infine come coadiuvanti alla lavorazione vengono utilizzati gli agenti scivolanti (saponi metallici, cere minerali e paraffine, alcoli grassi, siliconi) e gli agenti di espansione (solventi organici a basso punto di ebollizione e prodotti secondari nella costituzione dei polimeri) nella produzione di espansi, prodotti che per effetto del calore volatilizzano espandendo in questo modo il materiale plastico.

2.3 Il comportamento meccanico delle materie plastiche

Le costanti utilizzate nella progettazione - la Scienza delle Costruzioni - Le travi snelle, la legge di Hooke, l'influenza del tempo di sollecitazione, il rilassamento degli sforzi, la viscosità, il comportamento carico/allungamento a breve termine, il limite di proporzionalità, il limite di elasticità, il punto di snervamento, il limite di resistenza, il limite elastico, il modulo secante, il modulo di Young, l'effetto della temperatura, l'effetto della velocità di carico, l'anisotropia - Le proprietà meccaniche influenzate dal tempo, la sollecitazione statica, le componenti della deformazione, le curve isocrone, lo scorrimento, la microcavitazione, il modulo di scorrimento ("creep"), le deformazioni imposte, il modulo di rilasciamento - L'effetto della temperatura sulle proprietà meccaniche, i polimeri amorfi e cristallini, il comportamento duttile e fragile - I modelli viscoelastici, la molla, il dissipatore viscoso, il modello di Maxwell, il modello di Voight, il modello di Burger, l'equazione a carico costante, l'equazione a deformazione costante.

Per affrontare la progettazione di manufatti con qualsiasi tipo di materiale, la conoscenza delle caratteristiche comportamentali meccaniche dello stesso è il punto di partenza dal quale non si può prescindere.
Per le analisi comuni dei manufatti il progettista utilizza generalmente solo due costanti indipendenti per descrivere il comportamento meccanico di un materiale: il modulo di Young (E) e il coefficiente di Poisson (n). Solo i materiali isotropi ed elastici possono, però, essere analizzati correttamente utilizzando unicamente queste due costanti. In genere, poi, le stesse costanti vengono utilizzate per tutta la struttura, presupponendo, quindi, che il materiale sia anche omogeneo.
Nelle analisi correnti, dunque, si presuppone che un materiale sia linearmente elastico, omogeneo e isotropo: ciò risulta comodo anche in questa trattazione perché permette di rifarsi a equazioni standard, che risalgono alla Scienza delle Costruzioni e in

particolare alle teorie di De Saint Venant. Occorre comunque sottolineare che spesso si progettano manufatti realizzati con determinate materie plastiche, in particolare quelle rinforzate con vetro, che tendono a essere fortemente anisotrope: la mancanza di certezze sulle proprietà dei materiali e sulla validità delle equazioni standard obbliga, in queste situazioni, a effettuare un programma completo di prove sul prodotto finale, al fine di verificare sperimentalmente le ipotesi iniziali (Oberbach, Muller, 1987, pp. 8-11).

2.3.1 Il comportamento carico/allungamento a breve termine

Ogni manufatto è, in generale, un oggetto tridimensionale e, come tale, ogni elemento del materiale che lo costituisce è soggetto a uno stato di sforzo triassiale. Tuttavia è possibile studiare una importante categoria di problemi, quelli relativi alle travi snelle, assumendo come stato di sollecitazione quello monoassiale, dove solo la componente normale alla superficie sollecitata è diversa da zero. Nel caso monoassiale, la legge di Hooke è quella che regola il rapporto tra sforzi e deformazioni secondo l'equazione:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \qquad (2.1)$$

dove:

lo sforzo σ (N/mm^2) è dato dal rapporto tra il carico applicato e l'area della sezione trasversale sollecitata;

la deformazione ε (%) è data dal rapporto tra la variazione di lunghezza indotta dal carico applicato e la lunghezza originaria;
il modulo elastico E (N/mm^2) è una costante, caratteristica del materiale, definita sperimentalmente.
Il rapporto tra carico e allungamento in un materiale, definito dall'equazione (2.1), dipende, in generale, dalla temperatura e, nel caso particolare dei materiali polimerici, anche dal tempo e dalla velocità di trazione. Questi materiali, infatti, mostrano un comportamento diverso da quello elastico e reagiscono al carico in due modi: con la deformazione plastica (o scorrimento viscoso) e con l'elasticità. Mentre il comportamento elastico immagazzina energia nel materiale sotto forma di deformazione reversibile, in dipendenza del tempo, il comportamento viscoso, invece, dissipa l'energia sotto forma di calore di attrito e provoca una deformazione permanente del materiale. Il tipo di reazione predominante in un

materiale polimerico dipende dall'intensità, dalla durata e dalla velocità della sollecitazione o dell'allungamento imposti, in combinazione con la temperatura.
Per un materiale plastico, dunque, la legge costitutiva equivalente alla equazione (2.1) diventa (Celaschi, 1995, p. 52):

$$s(t) = \int_0^t E(t-T)e(T)dT \qquad (2.2)$$

dove:
t (s) è il tempo corrente;
T (s) è la variabile d'integrazione;
E(t) (N/mm^2) è detto modulo di scorrimento del materiale (o modulo di viscosità, oppure modulo di "creep", oppure ancora modulo apparente), di solito misurato in una prova a deformazione costante.
Dato che nei materiali plastici il modulo non è costante (come per i materiali elastici), ma funzione monotona decrescente rispetto al tempo (Fig. 12), definisce per questi materiali due fenomeni caratteristici: il rilassamento degli sforzi (imposta la deformazione lo sforzo diminuisce nel tempo) e la viscosità (imposto lo sforzo la deformazione aumenta nel tempo).
Il comportamento carico/allungamento a breve termine può essere descritto anche graficamente attraverso il diagramma sforzi-deformazioni. Nel caso di un materiale elastico questo diagramma assume un andamento tipico (Fig. 13) dove è possibile riconoscere (GE Plastics, 1994, pp. 16-18):

- un primo tratto (OA), dove il materiale obbedisce alla legge di Hooke, secondo cui le deformazioni sono direttamente proporzionali al carico applicato, rappresentato da un andamento lineare della curva. Il limite massimo (A) che il materiale è in grado di sopportare senza deviare dalla linearità è definito *limite di proporzionalità*: alcuni materiali plastici, in particolare, non presentano un limite di proporzionalità, dato che non esistono tratti della curva a essi relativa dove il carico sia proporzionale all'allungamento; comunque, alcuni di questi materiali possono resistere a carichi notevoli e riacquistare le dimensioni originarie quando il carico viene rimosso;
- il *limite di elasticità* (B), limite oltre il quale la deformazione nel materiale, una volta rimosso il carico, risulta permanente e irreversibile;

una pendenza nulla): alcuni materiali non possiedono punto di snervamento;

- il *limite di resistenza* (D), che rappresenta la massima sollecitazione a cui può resistere il materiale;
- la resistenza allo snervamento, cioè la resistenza nominale al punto di snervamento; per molti materiali, tra i quali quelli polimerici, che si snervano in modo graduale o che hanno un allungamento molto elevato allo snervamento, è difficile individuare questo punto, tanto che si preferisce considerare il *limite elastico* (E), espresso come percentuale dell'allungamento permanente: esso viene stabilito tracciando una linea parallela alla parte proporzionale della curva (OA) generalmente in corrispondenza di una deformazione pari allo 0.1 %;
- il *modulo secante*, dato dal rapporto tra carico e allungamento in qualsiasi punto della curva di carico/allungamento, rappresentato in figura dalla pendenza della retta OF. Per alcune materie plastiche, essendo difficile determinare la parte rettilinea della curva, si costruisce la tangente alla parte iniziale della curva, determinando il cosiddetto modulo iniziale; così ottenuto, questo modulo può non corrispondere alla realtà, per effetto del comportamento non lineare di alcune materie plastiche, tanto che alcuni produttori preferiscono indicare un modulo secante all'1 %, più puntuale nel definire il comportamento del materiale. Al di sotto del limite di proporzionalità, la pendenza della curva rappresenta, invece, il *modulo di elasticità normale* (modulo di Young) che, nel settore dei materiali plastici, viene più comunemente definito modulo di trazione (GE Plastics, 1994, p. 22). Il modulo di elasticità normale E (N/mm^2), il modulo di elasticità trasversale G (N/mm^2) (modulo di taglio) e il coefficiente di Poisson n (rapporto tra deformazione laterale e longitudinale, entro i limiti di elasticità), sono legati dalla seguente relazione:

$$G = \frac{E}{2(1+\upsilon)} \qquad (2.3)$$

Come detto in precedenza, è necessario considerare che la temperatura e la velocità di trazione possono incidere fortemente sul comportamento carico/allungamento dei materiali termoplastici (Fig. 14 e Fig. 15). Inoltre, a bassa temperatura, o elevata velocità di trazione, la curva può assumere un andamento tipico dei materiali fragili, cioè maggior pendenza iniziale, scostamento

minimo rispetto alla linearità iniziale e minor deformazione di rottura (Fig. 16); a temperatura elevata, o bassa velocità di trazione, la curva rivela il comportamento tipico dei materiali duttili, cioè pendenza iniziale ridotta, drastico scostamento dalla linearità iniziale ed elevata deformazione di rottura (Fig. 17).
La definizione del comportamento carico/allungamento a breve termine è utile nella scelta iniziale del materiale e, quindi, può essere impiegata per progettare componenti che non superino il limite di proporzionalità: in tal senso va sottolineato che la maggior parte dei componenti realizzati con resine termoplastiche vengono progettati in modo da non superare tale limite, utilizzando così le equazioni basate sulla teoria dell'elasticità (azione assiale, momento flettente, azione tagliante, momento torcente).
Nel caso delle materie plastiche occorre tener presente che, oltre alla temperatura e alla velocità di carico, il comportamento carico/allungamento è influenzato anche dall'anisotropia (a sua volta determinata dalla tecnica di lavorazione utilizzata) (11), in quanto, parallelamente all'orientamento delle molecole, la resistenza risulta maggiore e la duttilità minore: questa influenza fa si che, a differenza dei normali materiali elastici-lineari, per le materia plastiche il comportamento a compressione non è considerato identico a quello a trazione, tanto che sulle schede tecniche riguardanti il comportamento meccanico vengono riportate sia le proprietà a compressione, sia quelle a flessione (in genere, nei materiali rinforzati con vetro, il modulo di compressione è considerevolmente inferiore al modulo di trazione).

2.3.2 Proprietà meccaniche influenzate dal tempo

I materiali plastici hanno, come già detto, un comportamento viscoelastico, ossia un comportamento contemporaneamente di fluido viscoso e di solido elastico sotto l'azione di un carico o di una deformazione costanti applicati per un lungo periodo: in tal senso, sono da tenere attentamente in considerazione nella progettazione di manufatti plastici il fenomeno dello scorrimento plastico o "creep" e il fenomeno del rilasciamento delle tensioni o "stress relaxation". Il comportamento di carico/allungamento di breve durata, considerato precedentemente, avviene in genere nell'arco di meno di un'ora ed è, spesso, considerato istantaneo; la viscosità, invece, può continuare per tutta la vita utile di un manufatto, quindi anche per diversi anni.

La viscosità si può definire come la deformazione dovuta all'applicazione prolungata di una sollecitazione inferiore a quella di rottura del materiale (Bertacchi, 1980, p. 29).
Se, per esempio, un elemento strutturale in materia plastica viene sollecitato con un carico costante nel tempo (sollecitazione statica), l'equazione (2.2) diventa (Celaschi, 1995, p. 52):

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E(t)} \qquad (2.4)$$

dove:

σ_0 (N/mm^2) è lo sforzo costante applicato.
Tale deformazione è però destinata ad aumentare nel tempo, in virtù della diminuzione del modulo E(t) (Fig. 12), fino all'eventuale rottura per "creep".
Nelle materie plastiche, però, la viscosità assume connotati del tutto particolari rispetto ad altri materiali comuni, quali, a esempio, i metalli: infatti, essa non insorge solo al di sopra di una certa soglia di sforzo o temperatura elevati, ma si instaura per qualsiasi livello di sollecitazione; inoltre, le deformazioni, solitamente irrerversibili perché di natura plastica, se contenute nel campo delle piccole deformazioni risultano reversibili, tanto che, una volta cessata la sollecitazione, la deformazione accumulata viene recuperata in un tempo proporzionale a quello di carico. In pratica la deformazione in un materiale polimerico può essere considerata costituita da una componente elastica, da una componente viscoso-elastica e da una componente viscosa (Hoechst, 1979[1], pp. 10-11) (Fig. 18).
Di tutta la deformazione plastica, la componente elastica ε_{el} corrisponde a quella parte della deformazione che viene recuperata in modo spontaneo una volta cessata la sollecitazione; la componente viscoso-elastica ε_v indica quella parte di deformazione per il cui recupero occorre un periodo più prolungato; infine, la componente viscosa ε_{perm} viene definita come deformazione permanente. L'allungamento totale, quindi, è uguale a (Hoechst, 1979[1], p.14):

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_{el} + \varepsilon_v + \varepsilon_{perm} \qquad (2.5)$$

L'entità della deformazione complessiva, e indirettamente di quella permanente, dipende dalla durata di applicazione del carico (t), dalla sua intensità (σ) e dalla temperatura (q): questa relazione è

illustrata dalle curve isocrone di carico/allungamento, curve che hanno il vantaggio di illustrare in modo coinciso tutte le informazioni riguardanti l'effetto della sollecitazione, della temperaturatura e del tempo sull'entità della deformazione (Fig. 19 e Fig. 20) (12).
La viscosità, dunque, può causare, qualora gli sforzi ai quali viene sottoposto il manufatto raggiungano livelli elevati, fenomeni irreversibili, detti di snervamento, deformazioni localizzate provocate da scorrimento plastico che generalmente nelle materie plastiche assumono valori pari al 3-10% (nei metalli 1-2%) (Celaschi, 1995, p. 53-55).
I meccanismi di rottura, o di snervamento, che si possono incontrare sono due:

- il primo (scorrimento o "shear yielding") si ha quando un componente supera la massima deformazione ammissibile, con conseguente modifica della forma, ed è legato allo scorrimento delle catene macromolecolari nella direzione degli sforzi di taglio massimi; questo tipo di meccanismo, spesso, ingenera una frattura duttile, cioè legata a valori elevati di energia dissipati;
- il secondo (microcavitazione o "crazing") comporta, a differenza del primo, un aumento di volume ed è un processo di cavitazione con formazione di zone a densità ridotta rispetto a quelle circostanti; questo tipo di meccanismo può dar luogo a lesioni per fragilità, cioè legate a valori bassi di energia dissipata.

Ai fini della progettazione di manufatti e componenti è, dunque, importante conoscere la riduzione del modulo elastico del materiale nel tempo, definito in letteratura come modulo di scorrimento, modulo di "creep" o modulo apparente, in sostanza di una costante che tenga conto degli effetti della viscosità (Tab. 9).

Tab. 9 Moduli di scorrimento dei materiali termoplastici per costruzioni.
Si esaminano di seguito i moduli di scorrimento dei principali polimeri utilizzati nel settore delle costruzioni, in funzione di tempi di sollecitazione di 1 h, 100 h, 1000 h e 10000 h (Saechtling, 1993, p. 535).

Polimero	**Temp. °C**	**Sollec N/mm²**	**Moduli di scorrimento N/mm²**			
			1 h	**100 h**	**1000 h**	**10000 h**
Polietilene ad alta densità HDPE	20	5	490	250	180	140
Polipropilene PP	22	5	910	590	440	350
Polistirene PS	20	10	3100	2400		
Stirene/butadiene antiurto S/B	20	10	2700	2500		
Acrilonitrile/ butadiene/stirene ABS	20	15	3300	2500	1900	800
Polivinilcloruro PVC	20	10	3300	3100	2800	1900
Polimetilmetacrilato PMMA	20	10	3200	2900	2500	2000
Poliammide 6 PA6 25% FV	20	20	4100	3700	3300	3100
Copolimeri acetalici POM	20	20	2300	1500	1200	990
Polifenilossido PPO	23	21	2300	1800	1700	
Policarbonato PC	20	20	2000	1800	1650	1500
Polietilentereftalato PET	20	10	3500	3250	2900	2400

In questo senso, è possibile ricostruire l'andamento del modulo di un materiale in funzione del carico applicato, della temperatura e della durata della sollecitazione (Fig. 21) (13).
Il modulo di creep E_c (N/mm²) viene così definito (GE Plastics, 1994, p. 24):

$$E_c = \frac{\sigma}{\varepsilon_c} \qquad (2.6)$$

dove:

σ (N/mm²) è la sollecitazione di progetto;

ε_c (%) è la deformazione ricavata dalla curva di viscosità in corrispondenza di una temperatura e di un tempo determinati (Fig. 19).

Il valore del modulo così ricavato può essere sostituito, noto il tempo di sollecitazione, al modulo elastico E nelle equazioni classiche della teoria dell'elasticità.
Analogamente alla viscosità, anche il fenomeno del rilasciamento delle tensioni è figlio del comportamento viscoelastico dei materiali polimerici: questo fenomeno può essere descritto come la riduzione della tensione che si verifica nel tempo in un materiale viscoelastico sottoposto a una deformazione costante (GE Plastics, 1994, p.25) (Fig. 22).
Nella progettazione di componenti destinati a essere sottoposti a deformazione per periodi di tempo prolungati, quindi, è importante sapere in quale misura interverrà questo fenomeno e, per esempio, occorre tener conto:

- della diminuzione di compressione sui giunti di elementi a pressione;
- della perdita di forza di fissaggio di assemblaggi filettati precaricati;
- della diminuzione di elasticità nelle molle sottoposte a sollecitazione permanente.

Anche il rilasciamento delle tensioni viene influenzato dalla temperatura e può essere determinato sperimentalmente: si ottengono delle curve di rilasciamento, simili a quelle di deformazione sotto carico costante, da cui è possibile ricavare un modulo, analogo a quello di scorrimento, detto di rilasciamento, secondo l'equazione (2.7) (Hoechst, 1979[1], p. 12):

$$E_R(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0} \qquad (2.7)$$

dove:

$\sigma(t)$ (N/mm^2) rappresenta l'andamento della sollecitazione in funzione del tempo;

ε_0 (%) è la deformazione forzata costante;
$E_R(t)$ (N/mm^2) è il modulo di rilasciamento.
Comunque, è opportuno sottolineare che il modulo di rilasciamento (Fig. 23) è meno utilizzato rispetto a quello di scorrimento, tanto che, in via approssimativa, quest'ultimo viene spesso utilizzato anche per determinare la diminuzione della sollecitazione causata dal rilasciamento delle tensioni.
Naturalmente è sempre possibile modificare le caratteristiche di viscosità e di rilasciamento delle tensioni di un materiale plastico, mediante l'aggiunta di cariche e rinforzi (fibre di vetro, ecc.) che

contengono l'ampiezza dei due fenomeni, agendo in modo determinante sulle proprietà della resina.

2.3.3 Effetto della temperatura sulle proprietà meccaniche

Nei normali materiali metallici da costruzione il punto di fusione è generalmente molto al di sopra delle normali temperature d'esercizio: dunque, quando si utilizzano tali materiali a temperatura ambiente non è necessario preoccuparsi dell'eventuale influenza della temperatura sulle proprietà del materiale.
Nelle materie plastiche, invece, il punto di rammollimento può anche trovarsi a temperatura ambiente, tanto che le caratteristiche della maggior parte delle materie plastiche sono influenzate, in maniera determinante, dalla temperatura (Oberbach, Muller, 1987, p. 67).
Una caratteristica del comportamento dei materiali polimerici è il rapporto di proporzionalità inverso tra la deformazione e la temperatura: di conseguenza, la viscosità può essere accellerata dall'esposizione a temperature elevate, come diretta conseguenza della diminuzione del modulo apparente (GE Plastics, 1994, p. 36-37) (Fig. 24).
In generale, la resistenza meccanica e il modulo elastico diminuiscono con l'aumentare della temperatura, mentre, per contro, l'allungamento cresce; in particolare, il modulo elastico (Fig. 25) subisce una graduale riduzione man mano ci si avvicina alla temperatura di transizione vetrosa (Tg) del polimero: in questo senso, i polimeri amorfi sono caratterizzati da un rapido calo del modulo elastico sopra la Tg; invece, i polimeri cristallini mantengono un livello significativo di modulo elastico anche a temperature vicine a quella di fusione. I rinforzi, come le fibre di vetro, migliorano in maniera sensibile il modulo a temperature superiori alla Tg nei polimeri cristallini, mentre si hanno scarsi o nulli miglioramenti in quelli amorfi (Fig. 26). Esiste una misura sperimentale, definita temperatura di deformazione sotto carico ("Deflection Temperature Under Load" - DTUL, o "Heat Deflection Temperature" - HDT), con la quale si stabilisce la capacità relativa di un materiale polimerico di mantenere le proprie caratteristiche sotto carico e con temperatura elevata: nel caso delle resine amorfe, la DTUL è quasi uguale alla Tg, mentre i polimeri cristallini possono presentare valori di temperatura più bassi, anche se conservano intatta loro struttura anche a temperatura elevata. In generale, come per il modulo, l'aggiunta di cariche influenza in modo più significativo il

comportamento dei polimeri cristallini che non quello dei polimeri amorfi (GE Plastics, 1994, p. 32).
Per quanto concerne, invece, la resistenza all'urto, si è osservata, in molti materiali plastici, una drastica riduzione dei valori quando la temperatura scende al di sotto dei 23 °C, mentre, le resine rinforzate con fibre di vetro lunghe resistono anche a temperature inferiori (-40 °C). Infine, l'aumento della temperatura si accompagna nei materiali plastici alla riduzione dei valori di resistenza alla fatica.

2.3.4 Modelli meccanici del comportamento viscoelastico

I polimeri hanno un comportamento diverso sia rispetto a un solido elastico, sia rispetto a un corpo viscoso: infatti, tale comportamento è, grosso modo, la somma di quelli dei due diversi materiali, cioè viscoelastico. Da un punto di vista fisico (Fig. 27), è possibile immaginare il polimero come un groviglio di catene macromolecolari che interagiscono tra loro attraverso giunzioni labili ("entanglement") (La Mantia, 1995[1], p. 61): in questa schematizzazione le catene fra due giunzioni rappresentano le molle, quindi i corpi elastici, mentre le giunzioni rappresentano i punti di attrito, quindi i dissipatori viscosi costituenti il materiale.
Per meglio definire questi concetti diversi studiosi hanno elaborato dei modelli meccanici basati su varie combinazioni di modelli semplici come la molla e il liquido viscoso, modelli che è opportuno richiamare brevemente (La Mantia, 1995[1], pp. 60-64; Bertacchi, 1980, pp. 33-34; Mills, 1993, pp. 148-155) (Fig. 28).
Il primo modello è la molla, elemento che descrive il comportamento dei materiali elastici, materiali che seguono la legge di Hooke, gia richiamata nell'equazione (2.1):

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \qquad (2.1)$$

dove:
lo sforzo (σ) è proporzionale alla deformazione (ε) tramite la costante E, chiamata modulo elastico o di Young.
Sottoposto a sollecitazione il materiale elastico si deforma secondo l'equazione (2.1), per poi ritornare alla lunghezza iniziale una volta cessato lo sforzo (14).
Il secondo modello è un cilindretto contenente un liquido newtoniano di viscosità η, elemento che risponde all'equazione di Newton:

$$\sigma = \eta \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} \qquad (2.8)$$

dove:

lo sforzo (σ) è proporzionale alla velocità di deformazione ($d\varepsilon/dt$) (cioè la velocità con cui cambia la deformazione nel tempo), secondo il coefficiente di viscosità (η).

Nel fluido viscoso la deformazione cresce linearmente con la sollecitazione e rimane costante una volta cessato lo sforzo (15).

Il terzo modello considera molla e dissipatore viscoso in serie, elemento che descrive il comportamento viscoelastico come somma del comportamento elastico e di quello viscoso, secondo l'equazione di Maxwell:

$$\sigma = \eta \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} - \frac{\eta}{E} \cdot \frac{d\sigma}{dt} \qquad (2.9)$$

dove:

($d\varepsilon/dt$) è la variazione della deformazione col tempo;

($d\sigma/dt$) è la variazione dello sforzo col tempo.

Secondo questo modello la molla si deforma immediatamente sotto sollecitazione e, in seguito, il dissipatore viscoso continua a deformarsi in maniera indefinita nel tempo; nel momento in cui cessa la sollecitazione la deformazione non si annulla ma mantiene una componente residua viscosa costante. Il modello di Maxwell, che ha il merito di introdurre la dipendenza dello sforzo in un dato momento anche dallo sforzo dei momenti precedenti, cioè dalla storia degli sforzi subiti dal materiale, si avvicina a quanto sperimentalmente verificato sui liquidi viscoelastici, ma non spiega ancora del tutto il recupero della deformazione, verificato invece sui polimeri, nella fase di scarico (16).

Il quarto modello considera molla e dissipatore viscoso messi in parallelo, elemento descritto dall'equazione di Voigt:

$$\sigma = \eta \cdot \frac{d\sigma}{dt} + E \cdot \varepsilon \qquad (2.10)$$

Secondo questo modello, il materiale sottoposto a sollecitazione si deforma sino a un valore costante, mentre, una volta cessato lo sforzo, la deformazione decresce fino ad annullarsi: i due

andamenti sono non lineari e si spiegano con l'azione in parallelo della molla e del dissipatore viscoso; infatti, mentre la prima cerca di deformarsi immediatamente, il secondo la rallenta, sia in fase di carico che in fase di scarico; inoltre, per equilibrio con la molla, il dissipatore viscoso non può deformarsi in maniera indefinita, tanto che viene raggiunto un valore di deformazione costante. I due comportamenti, deformazione costante sotto sforzo a regime e nulla senza sforzo, sono stati sperimentalmente osservati nei materiali viscoelastici solidi: il modello, però, non riesce ancora a descrivere il fenomeno del rilasciamento delle tensioni che si registra nei materiali polimerici quando viene imposta una deformazione costante.
Il modello meccanico che, meglio di tutti, riesce a spiegare il comportamento viscoelastico delle materie plastiche è quello di Burger (Powell, 1983, pp. 88-94) (Fig. 29).
Questo modello consiste in una molla in serie con un elemento di Voigt, dove per equilibrio e compatibilità tra molla e dissipatore viscoso si hanno le seguenti relazioni:

$$\sigma = \sigma_1 = \sigma_2 + \sigma_3 \qquad (2.11)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \qquad (2.12)$$

dove:

σ (N/mm^2) è la sollecitazione totale;

σ_1 (N/mm^2) è la quota di sollecitazione totale assorbita dalla componente elastica del materiale;

$\sigma_2 + \sigma_3$ (N/mm^2) è la quota di sollecitazione totale assorbita dalla componente viscoelastica del materiale;

ε_1 (%) è la quota di deformazione totale assorbita dalla componente elastica del materiale;

ε_2 (%) è la quota di deformazione totale assorbita dalla componente viscoelastica del materiale.
L'equazione (2.11) e l'equazione (2.12) possono essere espresse in relazione a sforzi e deformazioni con i seguenti passaggi:

$$\sigma = \sigma_1 \qquad \varepsilon_1 = \frac{\sigma}{E_1} \qquad \varepsilon_2 = \varepsilon - \frac{\sigma}{E_1} \qquad (2.13)$$

$$\sigma_2 = E_2 \varepsilon_2 = E_2 \varepsilon - \frac{E_2 \sigma}{E_1} \qquad (2.14)$$

$$\sigma_3 = \sigma - \sigma_2 = \sigma - E_2\varepsilon + \frac{E_2\sigma}{E_1} \qquad (2.15)$$

$$\frac{d\varepsilon_3}{dt} = \frac{\sigma\left(1 + \frac{E_2}{E_1}\right) - \varepsilon E_2}{\eta_3} \qquad (2.16)$$

Se nel modello di Voigt la deformazione viscosa deve essere uguale a quella elastica ($\varepsilon_3 = \varepsilon_2$), dalle equazioni (2.13) si ottiene:

$$\frac{d\varepsilon_3}{dt} = \frac{d\varepsilon_2}{dt} = \frac{d\varepsilon}{dt} - \frac{1}{E_1}\frac{d\sigma}{dt} \qquad (2.17)$$

Elaborando l'equazione (2.17) e l'equazione (2.16) si ottiene la relazione generale tra sollecitazione applicata e deformazione totale:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E_2}{\eta_3}\varepsilon = \frac{E_1 + E_2}{\eta_3 E_1}\sigma + \frac{1}{E_1}\frac{d\sigma}{dt} \qquad (2.18)$$

Questa relazione nel caso di una sollecitazione costante, $d\sigma/dt = 0$, ci dà la formula per ottenere l'andamento del modulo di scorrimento in funzione del tempo:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E_2}{\eta_3}\varepsilon = \frac{E_1 + E_2}{\eta E_1}\sigma_0 \qquad (2.19)$$

dove:
E_1 (N/mm²) ed E_2 (N/mm²) rappresentano i limiti del modulo con t = 0 e t = ∞.
La relazione (2.18) nel caso di deformazione costante, $d\varepsilon/dt = 0$, ci dà la formula per calcolare il rilasciamento delle tensioni:

$$\frac{1}{E_1}\frac{d\sigma}{dt} + \frac{E_1 + E_2}{\eta_3 E_1}\sigma = \frac{E_2}{\eta_3}\varepsilon \qquad (2.20)$$

In definitiva, il modello di Burger, proponendo funzioni che fanno variare il modulo e/o il tempo di rilasciamento al crescere dello sforzo, tiene conto anche del comportamento viscoelastico non

lineare dei polimeri. La spiegazione di questo comportamento (La Mantia, 1995[1], p. 63) è legata alla struttura dei polimeri stessi: gli "entanglement" presenti nel polimero, essendo giunzioni labili che possono continuamente slacciarsi e riformarsi, sottoposti a un aumento della sollecitazione esterna, si staccano e diminuiscono di numero; poiché alle sottocatene fra due "entanglement" e agli stessi "entanglement" si affidano le proprietà viscoelastiche del materiale, la variazione del loro numero e della lunghezza delle molle (catene) fa variare la viscosità, il modulo elastico, e, quindi, anche il tempo di rilasciamento. Al crescere dello sforzo agente sul materiale, diminuisce, quindi, il numero degli "entanglement" e con essi la viscosità; di conseguenza si verifica il decadimento del modulo e la diminuzione dei tempi di rilasciamento.

2.3.5 Relazione tra parametri molecolari e proprietà meccaniche

Le proprietà meccaniche dei materiali polimerici sono determinate dalla loro struttura chimica, dalle catene molecolari e dalla loro morfologia (La Mantia, 1995[3], pp. 63-66; 1995[4], pp. 90-92). Quest'ultima è l'organizzazione spaziale che si danno le macromolecole e dipende, oltre che dal tipo di catene, dalle condizioni di lavorazione: infatti, le operazioni di trasformazione modificano la morfologia agendo sull'orientamento delle macromolecole e, in qualche caso, sulla cristallizzazione; inoltre, le lavorazioni possono modificare la struttura dei polimeri variandone il peso molecolare e, a volte, formando delle ramificazioni. Tutte queste variazioni sono legate alla sollecitazione termomeccanica agente sul polimero rammollito durante le operazioni di trasformazione in manufatto: nel caso di operazioni di estrusione o stampaggio gli sforzi sono prevalentemente legati al flusso della massa fusa e sono perciò sforzi di taglio che deformano e indeboliscono le catene macromolecolari predisponendole alla rottura; nel caso di operazioni di filatura o filmatura gli sforzi sono di elongazione e determinano l'orientazione e cristallizzazione delle catene macromolecolari.
Esistono relazioni precise tra parametri molecolari (quali il peso molecolare, le ramificazioni, la cristallinità e l'orientazione) e alcune proprietà meccaniche dei polimeri (quali il modulo elastico, la tensione e l'allungamento a rottura, la resilienza) (Tab. 10).

Tab. 10 **Relazione tra proprietà meccaniche e parametri molecolari**
Si evidenziano le relazioni esistenti tra l'aumento dei principali parametri molecolari dei materiali polimerici e alcune loro proprietà meccaniche (La Mantia, 1995[5]).

	Peso molecolare	Ramificazioni	Cristallinità	Orientazione
Modulo elastico	↑	↓	↑	↑↑
Tensione a rottura	↑	↓	↑	↑
Allungamento a rottura	↓	↓	↓	↓
Resilienza	↑	-	↓	↓ o ↑

Per quanto concerne il modulo elastico:
- cresce, in modo contenuto, con l'aumento del peso molecolare, anche in relazione all'aumento della temperatura;
- diminuisce con l'aumento del numero e della lunghezza delle ramificazioni (a causa dell'impedimento sterico, cioè spaziale, delle ramificazioni);
- cresce con l'aumento della cristallinità, in misura più elevata a temperature maggiori;
- cresce in modo netto con il grado di orientazione e, a temperatura ambiente, è oltre tre volte più alto di quello della fibra isotropa.

Per quanto concerne la tensione a rottura:
- non risente in modo particolare dell'aumento del peso molecolare, anche se manifesta una leggera crescita;
- presenta valori più bassi, a pari peso molecolare, nei polimeri ramificati in quanto presentano un numero minore di "entanglement" labili;
- cresce con l'aumento della cristallinità, che irrigidisce il materiale;
- cresce, sia nei polimeri semicristallini che in quelli amorfi, anche di 4-5 volte rispetto al valore del materiale non orientato.

Per quanto concerne l'allungamento a rottura:
- decresce con pesi molecolari molto elevati;
- decresce con l'aumento delle ramificazioni;
- decresce con l'aumento della cristallinità, in quanto il materiale si infragilisce;
- decresce con l'orientazione, dal 500-600 % al 20 % nei polimeri semicristallini, mentre cresce nei polimeri amorfi.

Per quanto concerne la resilienza:
- cresce all'aumentare del peso molecolare;
- diminuisce con l'aumentare del grado di cristallinità, in quanto il materiale si infragilisce;

- decresce con l'orientazione, dal 500-600 % al 20 % nei polimeri semicristallini, mentre cresce nei polimeri amorfi.

Per quanto concerne la resilienza:

- cresce all'aumentare del peso molecolare;
- diminuisce con l'aumentare del grado di cristallinità, in quanto il materiale si infragilisce;
- più complicato risulta l'effetto dell'orientazione, in quanto, aumentando quest'ultima, la resilienza cresce perpendicolarmente alla direzione di stiro, mentre diminuisce in direzione parallela a esso.

2.4 Il comportamento al fuoco

I materiali combustibili, gli agenti ritardanti di fiamma, la reazione al fuoco, il comportamento alla combustione, la temperatura d'accensione, la stabilità dimensionale.

Tutti i materiali basati sulla chimica del carbonio (i materiali organici) sono combustibili e tra questi, quindi, anche le materie plastiche: ma, nonostante non sia opinione diffusa (17), il comportamento al fuoco (18) dei materiali polimerici non provoca, in generale, più pericoli di altri materiali tradizionali; anzi, per la loro struttura chimica, alcune materie plastiche risultano difficilmente infiammabili e, con l'ausilio di particolari sostanze ignifughe è possibile ridurre notevolmente l'infiammabilità di molte altre (Saechtling, 1993, p. 15). Dunque, se è vero che, in un incendio già sviluppato, le materie plastiche bruciano come tutti i materiali combustibili (19), è anche possibile, però, intervenire sul cosiddetto "rischio d'incendio", cioè sulla sua fase di formazione (20), modificando caratteristiche quali l'accendibilità (21), e l'infiammabilità (22) di queste materie. Le sostanze che permettono di modificare il comportamento al fuoco delle materie plastiche sono chiamate agenti ritardanti di fiamma (Hellerich, Harsch, Haenle, 1990, pp. 285-286): si tratta, in generale, di composti di cloro, bromo e fosforo, che agiscono sulla fase di sviluppo e propagazione dell'incendio, per interruzione della fiamma o per formazione di uno strato superficiale di carbonio sul materiale (simile a quello che si forma durante la combustione del legno).

Si distinguono:

- agenti ritardanti la fiamma di tipo additivo, impiegati in maggior parte con materiali termoplastici, mescolati ai granuli del polimero;

- agenti ritardanti la fiamma di tipo reattivo, impiegati in particolare con materiali termoindurenti, inglobati nella molecola del polimero.

Comunque, nella scelta di un materiale da costruzione, quindi anche nel caso delle materie plastiche, il comportamento al fuoco deve essere oggetto di attente valutazioni da parte del progettista, senza dimenticare che, in particolare dell'edilizia, ciò non elimina i rischi d'incendio che, in buona parte, dipendono anche dal modello dell'edificio, dalla destinazione d'uso prevista, dai percorsi di fuga e dai dispositivi di sicurezza. Ai fini di una scelta corretta è opportuna, dunque, una classificazione dei materiali polimerici (23) e, in questo senso, può essere d'aiuto la valutazione della loro reazione al fuoco (24), definita dal Decreto Ministeriale del 30 Novembre 1983 come << il grado di partecipazione di un materiale combustibile al fuoco al quale è sottoposto >>: indicativamente, tra le materie plastiche utilizzate in edilizia, si va dal polivinilcloruro (PVC) per serramenti che è considerato autoestinguente (classe 1) (25), al polistirene espanso (EPS) che è considerato molto infiammabile (classe 5) (26).

Una interessante classificazione, in base al comportamento alla combustione (27), è quella prevista per i materiali plastici utilizzati come isolanti elettrici, secondo la norma tedesca DIN IEC 707 / VDE 0304 T4 e la norma statunitense UL 94 (28), norma che, essendo applicata in ambito internazionale, rappresenta un valido riferimento in questo campo (Tab. 11).

Un'altra caratteristica che può essere utile conoscere, nella valutazione del rischio d'incendio correlato a un materiale, è la temperatura d'accensione (Tab. 12), cioè quella temperatura alla quale, anche in assenza di fiamma esterna, il materiale brucia per auto-accensione: sotto questo punto di vista, occorre sottolineare come, rispetto al legno o ai tessuti, le materie plastiche abbiano delle temperature di auto-accensione molto più alte (Maffei, Marchetti, 1995[3], p. 32).

Infine, poiché tutti i materiali polimerici, all'aumentare della temperatura, perdono di consistenza, nella valutazione del loro comportamento al fuoco, oltre ai criteri precedentemente descritti, deve rientrare anche la stabilità dimensionale, in genere misurata con la prova Vicat (Tab. 6), caratteristica che, nel caso particolare del settore delle costruzioni, è di fondamentale garanzia per l'efficienza dell'edificio e per la sicurezza e l'incolumità di chi vi abita.

Tab. 11 Comportamento alla combustione di materiali isolanti elettrici secondo DIN IEC 707 / VDE 0304 T3 e UL 94 (cfr. nota 28)

Si esaminano di seguito i risultati delle prove, relative al comportamento alla combustione, eseguite secondo i dettami della norma tedesca DIN IEC 707 / VDE 0304 e della norma internazionale UL 94, riferite ai principali polimeri plastici non additivati con antifiamma (Saechtling, 1993, p. 521).

Materiale	Metodo BH	Metodo UL 94
Polietilene a bassa densità LDPE	BH3-15 mm/min	HB
Polietilene ad alta densità HDPE	BH3-15 mm/min	HB
Polipropilene PP	BH3-20 mm/min	HB
Polistirene PS	BH3-15 mm/min	HB
Stirene/butadiene SB	BH3-15 mm/min	HB
Acrilonitrile/ butadiene/stirene ABS	BH3-25 mm/min	HB
Polivinilcloruro PVC	BH2-5 mm	
Copolimero acetalico POM	BH3-15 mm/min	HB
Poliammide PA6	BH2-15 mm	V2
Policarbonato PC	BH2	V2
Polifenilossido PPO	BH2-25 mm	V1

Tab. 12 Temperature d'accensione di vari materiali secondo Astm 1929

Si esaminano di seguito le temperature d'accensione, in presenza di sorgente esterna o per autocombustione, di alcuni materiali polimerici confrontati con materiali tradizionali quali legno e tessuti (Maffei, Marchetti, 1995[3], p. 32).

Materiale	Accensione °C	Auto-accensione °C
Polimetilmetacrilato PMMA	280-300	450-462
Polietilene PE	341-357	349
Polistirene PS	345-360	488-496
Polivinilcloruro PVC	391	454
Poliammide PA	421	424
Poliestere UP	346-399	483-488
Laminato melamminico	475-500	623-645
Lana	200	
Cotone	230-266	254
Pino	228-264	260
Douglas	260	

2.5 Le applicazioni delle materie plastiche in edilizia

I pannelli portanti, i pannelli compositi per esterni, i pannelli di rivestimento interno, le finiture, i pavimenti, le coperture, gli infissi, le tubazioni, i sanitari, le resine espanse, le colle, gli adesivi, i rivestimenti, il calcestruzzo polimerico.

Il 20% del totale della produzione di materie plastiche è utilizzato nel settore delle costruzioni (APME, 1995[4]): caratteristiche quali la leggerezza, la formabilità, il potere fono/termo-isolante e la durabilità fanno dei materiali polimerici degli ottimi materiali da costruzione, da molti anni in concorrenza con quelli tradizionali. In tal senso, come già ribadito in precedenza, esistono, comunque, forti resistenze di ordine culturale che limitano, forse oltre il dovuto, l'impiego di questi materiali ad applicazioni formalmente secondarie: laddove un materiale plastico viene utilizzato in applicazioni non secondarie, vi è sempre la tendenza a mascherarne l'aspetto con processi di mimesi. Nonostante tutto, le materie plastiche si sono conquistate importanti nicchie di mercato sia a livello impiantistico che a livello componentistico. Tra le principali applicazioni si possono citare (Maura, 1992, pp. 363-374; Mariani, 1994):

- i pannelli portanti utilizzati nelle costruzioni prefabbricate; sono costituiti da due lastre esterne in poliestere (PRFV) o in polivinilcloruro (PVC), entrambi fibro-rinforzati, e da una anima interna in resina espansa, rigida e resistente (poliuretano - PUR);
- i pannelli compositi di rivestimento esterno in poliestere (PRFV) o in policarbonato (PC) fibro-rinforzati (29);
- i pannelli di rivestimento interno; sono laminati semplici a base di fenoplasti (PF) che sono rivestiti, nel caso dei pannelli stratificati, con resina melamminica (MF); esistono, inoltre, applicazioni di laminati in polivinilcloruro (PVC) e in resina acrilonitrile/butadiene/stirenica (ABS) come, per esempio, le piastrelle di rivestimento;
- gli elementi estrusi per finiture; si tratta di cornici, paraspigoli, battiscopa e corrimano in polivinilcloruro (PVC) plastificato;
- le pavimentazioni; si tratta dei vari tipi di linoleum (30) e delle mattonelle (tipo legno, marmo o pietra) ottenute con polivinilcloruro (PVC), fenoplasti (PF), resine epossidiche (EP) e gomme sintetiche; vi sono, inoltre, materiali utilizzati negli impasti per pavimentazioni continue come i mastici a base di polivinilacetato (PVA) miscelati, in generale, con polvere di marmo o di calcare, e gli impasti di copolimero vinilacrilici o di poliuretani per pavimentazioni sportive;
- le coperture; si tratta di lastre trasparenti di polimetilmetacrilato (PMMA) e di policarbonato (PC) (31), utilizzate per lucernari,

cupole emisferiche, coperture di impianti sportivi e di capannoni industriali, passaggi pedonali, recinzioni di campi sportivi, vetrate di sicurezza e arredo urbano (GE Plastics, 1993[2]);

- i vetri organici rinforzati; offrono il vantaggio di non essere infiammabili, ma hanno proprietà ottiche più scadenti; sono a base di poliestere rinforzato (PRFV);
- gli infissi; sono realizzati con polivinilcloruro (PVC) per quanto concerne avvolgibili, persiane, imposte, porte (con interposto strato di schiuma poliuretanica) e finestre, con resina acrilonitrile/butadiene/stirenica (ABS) per maniglie e manopole, con resine autolubrificanti (politetrafluoroetilene - PTFE o teflon) per chiavistelli, perni e cardini;
- le tubazioni; si usa polivinilcloruro (PVC) rigido e polietilene (PE) per l'acqua fredda e per le acque di rifiuto, mentre si usa polivinilcloruro (PVC) plastificato per i tubi flessibili;
- i raccordi, le valvole e la rubinetteria; sono in resina acrilonitrile/butadiene/stirenica (ABS), adatta per l'acqua calda; questi componenti possono essere cromati;
- i pluviali e le grondaie in polivinilcloruro (PVC) rigido;
- i tubi resistenti agli agenti chimici aggressivi in poliestere rinforzato (PRFV);
- gli accessori sanitari, quali le cassette per water e i sifoni in polistirene antiurto (SB) e polipropilene (PP), i lavabi, le vasche da bagno, i water e i bidé in polimetilmetacrilato (PMMA) e poliestere rinforzato (PRFV);
- i materiali espansi, usati come imballaggi, isolanti, alleggerimenti per calcestruzzo, schiume per intercapedini murarie, tra cui la gomma schiuma usata per cuscini, sedili, tappetti e supporto per moquettes, il polistirene espanso (EPS), il poliuretano espanso (PUR), le resine fenolo-formaldeide e urea-formaldeide;
- le colle (con le quali vengono impastati anche gli intonaci plastici), gli adesivi e i mastici; in particolare, le poliacetoviniliche (vinavil), gli adesivi in soluzione (polistirene, poliacrilati e acetato di polivinile), gli adesivi a base di resine termoindurenti, i mastici a base di resine sintetiche;
- i rivestimenti plasticizzati (polietilene - PE, polivinilcloruro - PVC e poliestere - UP) per tubi di acciaio, reti e fili di ferro, serbatoi in acciaio o calcestruzzo, cavi e fili elettrici;
- i manti impermeabili per fondamenta, coperture piane, strutture interrate, discariche, a base di polivinilcloruro (PVC) plastificato, gomme sintetiche (EPDM), polietilene clorurato (CPE) e polietilene ad alta densità (HDPE);

- il calcestruzzo polimerico (32), che viene confezionato con i metodi usuali della prefabbricazione, previa aggiunta di monomeri liquidi (stirene, acrilonitrile, acetato di vinile e metacrilato) che polimerizzano all'interno dei pori; questi calcestruzzi presentano, in virtù della minore porosità, maggiore resistenza meccanica e maggiore durabilità; la resistenza chimica e all'abrasione ne favorisce l'impiego per pavimenti industriali, containers, condutture per liquidi aggressivi e opere idrauliche, mentre il basso assorbimento d'acqua (a minore cloro assorbito corrisponde una minore depassivazione) ne permette l'utilizzo per ponti autostradali.

Note di approfondimento

1. Per quanto riguarda la *conoscenza delle materie plastiche*, si rimanda a due manuali, tra i maggiori in uso, che illustrano in modo semplice e chiaro, anche per chi non possiede basi sufficienti di chimica organica e inorganica, i tipi, i processi di trasformazione e le caratteristiche dei polimeri attualmente prodotti. Questi testi sono: Hellerich Walter, Harsch Gunther, Haenle Siegfried, *Prontuario delle materie plastiche*, Tecniche Nuove, Milano, 1990, 3ª ed; Saechtling Hansjurgen, *Manuale delle materie plastiche*, Tecniche Nuove, Milano, 1993, 6ª ed.
2. In merito ai *processi di trasformazione* utilizzati nella lavorazione delle materie plastiche, si distinguono (Tab. 13), per i materiali termoplastici, i processi durante i quali la massa polimerica viene fusa, formata e poi raffreddata (stampaggio a iniezione, stampaggio rotazionale, estrusione, soffiaggio, rivestimento a letto fluido), dai processi durante i quali un semilavorato viene semplicemente formato a caldo (termoformatura); per i materiali termoindurenti i processi avvengono per reazione chimica delle resine nello stampo (stampaggio a compressione, stampaggio a trasferimento, stampaggio a iniezione, stampaggio RIM - "Reaction Injection Moulding", stampaggio di espansi, colata) (Hellerich, Harsch, Haenle, 1990, pp. 27-33) (Saechtling, 1993, pp. 52-152).

Tab. 13 Principali tecnologie di trasformazione delle materie plastiche
Si esaminano di seguito i principali processi di trasformazione utilizzati nella lavorazione delle materie plastiche, unitamente ai manufatti che vengono prodotti mediante queste tecnologie (Celaschi, 1995, p. 84).

Tecnologia di trasformazione	Prodotti
Stampaggio a compressione	Lastre, componenti piani
Soffiaggio	Bottiglie, corpi cavi
Estrusione	Lastre, tubi, profilati
Letto fluido	Rivestimenti di parti metalliche
Stampaggio a iniezione	Prodotti vari
Colata	Serbatoi, oggettistica
RIM	Parti di carrozzeria, grandi componenti
Stampaggio rotazionale	Serbatoi, contenitori, forme cave
Stampaggio di espansi	Arredamento, lastre, pannelli
Termoformatura	Vassoi, imballaggi, coperture
Stampaggio a trasferimento	Parti complesse e delicate

3. In riferimento alla *definizione chimica dei polimeri*, la nomenclatura è definita dalla norma DIN 7728 T1 "Lettere di riferimento e sigle per polimeri e loro particolari caratteristiche" (Hellerich, Harsch, Haenle, 1990, pp. 382-390). Tra i polimeri che vengono citati nella tesi vi sono:
ABS - acrilonitrile/butadiene/stirene, EP - epossidi, PA - poliammidi, PBT - polibutilentereftalato, PC - policarbonato, PE - polietilene, PET - polietilentereftalato, PMMA - polimetilmetacrilato, PP - polipropilene, PPO - polifenilossido, PS - polistirene, PUR - poliuretani, PVC - polivinilcloruro, PVDF - polivinildensolfuro, UP - poliestere insaturo.
4. Per quanto concerne *il processo di polimerizzazione*, si distinguono due tipi di reazione: la reazione di condensazione e la reazione di addizione. Con il primo tipo di reazione i polimeri si formano partendo da monomeri bi o polifunzionali, attraverso l'eliminazione di molecole quali acqua, acido cloridrico e metanolo; in questo caso, la struttura chimica del polimero non è identica a quella dei monomeri di partenza. Con il secondo tipo di reazione, invece, i polimeri si formano per somma di monomeri, attraverso l'azione di sostanze catalizzatrici che predispongono i monomeri all'unione tra loro, mediante formazione di radicali liberi e instabili (Maffei, Marchetti, 1995[1], pp. 17-18).
5. In merito ai *polimeri termoplastici*, appartengono a questa famiglia (Hellerich, Harsch, Haenle, 1990) le poliolefine (polietilene - PE, polipropilene - PP), i polimeri di cloruro di vinile (PVC, rigido e plastificato), i polimeri stirenici (polistirene - PS, stirene/butadiene SB, stirene/acrilonitrile - SAN, acrilonitrile/ butadiene-stirene - ABS, acrilonitrile/stirene - ASA), gli esteri della cellulosa (CA, CP, CAB), i polimeri fluorurati (politetrafluoroetilene - PTFE), il polimetilmetacrilato (PMMA), le resine acetaliche (poliossimetilene - POM), le poliammidi (PA), i poliuretani termoplastici (TPU), i poliesteri lineari (polietilentereftalato - PET, polibutilentereftalato - PBT), il

policarbonato (PC), il polietere modificato (polifeniletere - PPO, PPE), i polisolfoni (PSU, PES, PPSU), il polifenilensolfuro (PPS), le poliimmidi (PI), i poliarilchetone (PEK, PEEK).
Tra i materiali termoplastici, in termini quantitativi, la produzione principale riguarda (APME, 1995[2], p. 4) il polietilene ad alta densità - HDPE (bottiglie per alimenti, detergenti e cosmetici, contenitori, giocattoli, casalinghi, taniche per combustibile, imballaggi industriali e film, fogli, tubi del gas e di scarico), il polietilene a bassa densità - LDPE (laminati, sacchetti, film per imballo industriale, giocattoli, rivestimenti, contenitori flessibili, tubi per irrigazione e film per vari usi), il polietilentereftalato - PET (bottiglie, imballaggi per alimenti, tappeti, rinforzi per pneumatici), il polipropilene - PP (imballaggi quali contenitori per yogurt e margarina, confezioni per dolci e spuntini, contenitori per batterie d'auto, rivestimenti interni di contenitori per cereali, vaschette per forni a microonde, imballi medicinali, contenitori per latte e birre, componentistica per auto, tappeti, fibre e componentisca elettrica), il polistirene - PS (imballaggi, contenitori per latticini, apparecchiature elettriche, isolanti termici, audiocassette, tazze e piatti) e il polivinilcloruro - PVC (seramenti per finestre, tubature, pavimentazioni, rivestimenti per pareti, bottiglie, film da imballaggio, grondaie, isolamento per cavi, carte di credito, prodotti medicinali comprese le sacche per il plasma).
6. In merito ai *polimeri termoindurenti*, appartengono a questa famiglia (Hellerich, Harsch, Haenle, 1990) le resine a base di fenolo (PF), a base di cresolo (CF), le resine ureiche (UF) e melamminiche (MF), il poliestere insaturo (UP), le resine epossidiche (EP), i poliuretani (PUR). Tra i materiali termoindurenti, in termini quantitativi, la produzione principale riguarda (APME, 1995[2], p. 3) le resine epossidiche - EP (adesivi, componentistica per auto, componentistica elettrica ed elettronica, attrezzature sportive, barche), le resine fenoliche - PF (adesivi, laminati, forni, tostapane, prese elettriche, manici per recipienti e coltelleria, parti di automobili come le pompe per l'acqua, le valvole a farfalla, i pistoni, parti del motore, componentistica elettrica quale i pannelli per circuiti) e i poliuretani - PUR (rivestimenti, finiture, additivi per migliorare la resistenza della gomma agli agenti chimici e all'ozono, paraurti, ingranaggi, diaframmi, guarnizioni, cuscini, materassi e sedili per autovetture).
7. Per quanto riguarda i *polimeri a struttura cristallina*, appartengono a questa classe il polietilene (PE), il polipropilene (PP), le poliammidi (PA), i poliesteri, il nylon, le resine poliacetaliche (POM), i cristalli liquidi (LC) (Hellerich, Harsch, Haenle, 1990, pp. 12-13).
8. Alla categoria dei *polimeri di massa* appartengono il polietilene (PE), il polipropilene (PP), il polistirene (PS), il polietilentereftalato (PET), il polivinilcloruro (PVC) e, tra le resine termoindurenti, il poliuretano (PUR).
9. Alla categoria dei tecno*polimeri* appartengono, tra gli altri, alcuni materiali utilizzati in edilizia, quali il policarbonato (PC), il polimetilmetacrilato (PMMA) e il polifenilossido modificato (PPO).
10. Per quanto concerne *le fibre di rinforzo*, le più comuni sono le fibre di vetro, le fibre di carbonio e le fibre aramidiche (Kevlar), la juta, le fibre di nylon e le fibre poliestere (Hellerich, Harsch, Haenle, 1990, p. 17). In edilizia numerose sono le applicazioni di materiali, in particolare poliestere, fibro-rinforzati: in merito, si rimanda a Cognard Philippe, *Les applications industrielles des matériaux composites*, Editions du Moniteur, Paris, 1989, 2 voll.; Hollaway Leonard, *Polymers and Polymer Composites in Construction*, Teldford, 1990, London; Scheichenbauer Mario, *Progettare con il poliestere rinforzato*, ITEC Editrice, Milano, 1982, 2ª ed.
11. In merito *ai parametri di lavorazione che influenzano l'anisotropia*, questi sono i punti d'iniezione, i canali d'alimentazione, la temperatura del materiale e dello stampo, le condizioni dello stampo, le posizioni delle linee di giunzione e la pressione d'iniezione e di ciclo (GE Plastics, 1994, p.19).
12. In riferimento alle *influenze sul comportamento viscoso dei polimeri*, oltre alle variabili relative all'entità della sollecitazione, alla sua durata e alla temperatura di esercizio, bisogna tener conto che, nel caso di materiali igroscopici, anche le condizioni di umidità influenzano tale comportamento, di fatto rendendo necessarie un numero di curve isocrone maggiori. Inoltre, nel caso si debbano calcolare elementi strutturali impiegati in particolari ambienti chimici (oli, solventi, ecc.), bisogna tenere in conto le possibili situazioni di "stress-craking" legate a queste condizioni ambientali (Bertacchi, 1980, p. 39).
13. Circa *la variazione del modulo di scorrimento* che dipende dal tipo di polimero, dal tempo, dalla temperatura e dall'entità della sollecitazione, valgano come esempi i seguenti: nel caso di un omopolimero acetalico, per una sollecitazione di progetto pari a 30 N/mm^2, alla temperatura di 40° C e per la durata di 4000 giorni (100000 ore circa), il modulo di scorrimento varia da 2400 N/mm^2 a 900 N/mm^2 (Bertacchi, 1980, p. 38); nel caso, invece, di un policarbonato, per una sollecitazione di progetto pari a 20 N/mm^2, alla temperatura di 80° C e per la durata di 400 giorni

(10000 ore circa), il modulo di scorrimento varia da 3500 N/mm^2 a 1750 N/mm^2 (GE Plastics, 1989, p.27).
14. Riguardo al *comportamento elastico*, si dice che il materiale elastico ha una memoria perfetta in quanto "si ricorda" del suo stato iniziale (La Mantia, 1995[1], p. 61).
15. Circa il *comportamento viscoso*, si dice che il fluido viscoso non ha memoria, non "si ricorda" il suo stato iniziale ma conosce solo quello attuale (La Mantia, 1995[1], pp. 61).
16. In riferimento al *comportamento viscoelastico* si dice che un corpo viscoelastico presenta una memoria evanescente, "non si ricorda bene" il suo stato iniziale e, pur tentando di recuperare la deformazione, non riesce ad annullarla (La Mantia 1995[1], p. 61).
17 A riguardo *dell'opinione diffusa sul comportamento al fuoco delle materie plastiche*, valga quanto scritto in un recente articolo sulle materie plastiche in edilizia (Maffei, Marchetti, 1995[3], p. 32): "[...] da parte dell'opinione pubblica vengono rivolti sospetti e accuse alle materie plastiche e ai loro fumi in ogni evenienza d'incendio. E questo è in parte giustificato dal fatto che le materie plastiche sono prodotti basati sulla chimica del carbonio e il carbonio è un combustibile. Ma fumi e gas velenosi si sprigionano anche da arredamenti e strutture in legno o di materiale cellulosico, di seta o di lana. Da tutti questi materiali il gas più velenoso che si sviluppa è l'ossido di carbonio ma dalla lana per esempio si può sviluppare anche acido cianidrico altrettanto pericoloso. Da tutto ciò si deduce l'ingenuità e la eccesiva semplificazione nell'attribuire da parte soprattutto dei mezzi di informazione la maggiore responsabilità alle materie plastiche in caso di tradegie per fuoco. Gli autentici responsabili sono invece l'incoscienza e l'ignoranza [...]".
18. In merito al *comportamento al fuoco*, per un elemento costruttivo questo termine comprende la "resistenza" e la "reazione" al fuoco (Romanelli, 1987, p. 52). Per resistenza al fuoco (UNI 7678) si intende la durata in minuti misurata dall'inizio del periodo di riscaldamento al momento in cui il componente non soddisfa più la stabilità meccanica, la tenuta alla fiamma e l'isolamento termico richiesti dalle specifiche di partenza. Per reazione al fuoco (UNI 7677) si intende, invece, il grado di partecipazione di un materiale combustibile a un fuoco al quale è sottoposto. Nel caso delle materie plastiche, trattandosi di materiali infiammabili, occorre, quindi, considerare entrambi i fattori.
19. Per quanto riguarda la *combustibilità di un materiale da costruzione*, occorre precisare che essa non deve rappresentare una discriminante al suo impiego: infatti, anche i materiali incombustibili presentano pericoli in caso d'incendio; questi materiali, infatti, non promuovono l'incendio con la liberazione di energia termica, ma possono aiutarne la propagazione per conduzione e irraggiamento (AIPE, 1991[1], p. 3).
20. Per quanto concerne *le fasi di un incendio in una costruzione*, si possono distinguere tre stadi (AIPE, 1991[1], pp. 2-4): il primo stadio, durante il quale il fuoco si sviluppa da una sorgente iniziale, che riscaldata si trasforma in gas infiammabile che reagisce con l'ossigeno, per poi propagarsi rapidamente per conduzione, convenzione e irraggiamento ("flash over") in tutto il locale, rimanendo, però, contenuto al suo interno; il secondo stadio, durante il quale il fuoco si espande, attraverso le aperture, ai locali adiacenti fino a coinvolgere l'intera costruzione; il terzo stadio, durante il quale il fuoco si estende agli edifici circostanti. Per la valutazione della pericolosità di un materiale è fondamentale il comportamento durante il primo stadio, mentre nel caso di un componente portante o di chiusura è determinante il comportamento nel secondo stadio; il passaggio al terzo stadio dipende, invece, dalla grandezza e dalla distribuzione delle aperture verso gli edifici circostanti.
21. Il termine *accendibilità* si riferisce all'attitudine di un materiale a liberare dalla superficie, per sollecitazione termica, quantità più o meno grandi di gas combustibili (AIPE, 1991[1], pp. 3-4).
22. Il termine *infiammabilità* si riferisce all'attitudine di un materiale a far propagare la fiamma in superficie più o meno rapidamente, specialmente in direzione verticale (AIPE, 1991[1], p. 4).
23. Circa la *classificazione dei materiali polimerici in base alla reazione al fuoco*, i polietileni (PE) e i polipropileni (PP) hanno una combustione lenta, il polistirene (PS), le resine acrilonitrile/ butadiene/stireniche (ABS) e gli elastomeri sono infiammabili, il polimetilmetacrilato (PMMA) e i poliuretani (PUR) sono poco infiammabili, il polivinilcloruro (PVC) le poliammidi (PA), i fenoplasti (PF), le resine ureiche (UF) e melamminiche (MF) e le resine epossidiche (EP) sono non infiammabili (Maura, 1992, appendice, Tabella C).
24. Per quanto concerne la *reazione al fuoco* esistono, a livello europeo, numerose norme di riferimento basate su prove empiriche standardizzate, norme che, faticosamente, si sta cercando di armonizzare; in Italia la materia fa riferimento al Decreto Ministeriale del 26 Giugno 1984 che prevede l'impiego di quattro prove (UNI-ISO 1182 per la prova di non combustibilità; UNI 8456 per la reazione al fuoco dei materiali sospesi e suscettibili di essere investiti da una piccola fiamma su entrambe le facce; UNI 8457 per la reazione al fuoco dei materiali che

possono essere investiti da una piccola fiamma su entrambe le facce; UNI 9174 per la reazione al fuoco di materiali sottoposti all'azione di una fiamma d'innesco in presenza di calore radiante) per la suddivisione dei materiali in cinque classi (0-5), di cui quelli di classe 0 sono incombustibili e quelli di classe 5 presentano la reazione al fuoco peggiore. In Germania i materiali da costruzione sono suddivisi, secondo la norma DIN 4102, in classe A (non combustibili) e classe B (combustibili); all'interno della seconda classe, alla quale appartengono le materia plastiche, si distinguono, inoltre, le classi B1 per i materiali difficilmente infiammabili, B2 per quelli normalmente infiammabili e B3 per quelli facilmente infiammabili (in generale, i materiali plastici additivati con antifiamma rientrano nella classe B1). In Francia i materiali da costruzione sono divisi in sei classi a partire dalla classe M0 per i non combustibili fino alla classe M6 per i materiali molto facilmente infiammabili. Nel Regno Unito i materiali sono classificati in quattro classi (1-4) in base alla velocità di propagazione superficiale della fiamma. Infine, in Svizzera i materiali sono suddivisi in base al loro grado di combustibilità (grado I molto infiammabile - grado V difficilmente combustibile) e il base al grado di formazione dei fumi (1 forte formazione - 3 debole formazione) (Romanelli, 1987, pp. 57-74).
25. In riferimento al *comportamento al fuoco del polivinilcloruro (PVC)*, molto spesso è stato avanzata una sua presunta pericolosità negli incendi, dovuta allo sviluppo di acido cloridrico (HCl). In tal senso i produttori di manufatti in PVC fanno notare che questo materiale è autoestinguente, quindi cessa di bruciare quando viene allontanata la fiamma, e sviluppa un calore molto più basso di altri materiali tradizionali. Inoltre, la formazione di acido cloridrico (HCl), essendo di odore acre e pungente, riduce le possibilità di avvelenamento rispetto all'ossido di carbonio (CO) che, invece, è un gas inodore, insapore e incolore: di conseguenza lo sviluppo di acido cloridrico può svolgere una efficace azione di allarme specie nel caso di incendi sommersi (per esempio quelli innescati dai corti circuiti). Infine, prove effettuate su profilati in PVC hanno dimostrato come i manufatti realizzati con questo materiale non trasmettano calore, garantendone la resistenza al fuoco (Associazione Nazionale Serramenti PVC, 1993, pp. 24-25, pp. 37-38).
26. Riguardo alla *reazione al fuoco del polistirene espanso (EPS)*, occorre notare che se, da un lato, preso singolarmente risulta essere di classe 5 (altamente infiammabile), dall'altro lato, è vero anche che, in generale, questo materiale è all'interno di intercapedini murarie, solette, getti di calcestruzzo e, quindi, sottratto a un possibile contatto diretto con la causa d'innesco di un incendio. In tal senso, considerando anche l'introduzione di adeguati additivi, il materiale, che non brucia in assenza di fiamma d'innesco o altra fiamma esterna, può essere collocato nella classe 1, come materiale scarsamente infiammabile (AIPE, 1991[1], pp. 8-11).
27. Per *comportamento alla combustione* si intendono tutte le variazioni fisiche e chimiche che avvengono quando i manufatti di materie plastiche sono sottoposti al fuoco in modo controllato (Hellerich, Harsch, Haenle, 1990, p. 285).
28. In riferimento alle *norme per il comportamento al fuoco dei materiali isolanti elettrici*, esse prevedono metodi di prova che valutano l'infiammabilità e la propagazione della fiamma su spigoli e/o superfici di un provino di materiale plastico sottoposto per breve tempo a una fiamma di accensione normalizzata. Secondo la norma tedesca DIN IEC 707 / VDE 0304 il materiale viene classificato come BH1 se, nel tempo di tre minuti, la barretta fonde per meno di 5 mm e non si accende; come BH2 se il bordo brucia sino a 95 mm (si indica la lunghezza totale di combustione) e come BH3 per bruciature superiori ai 95 mm (si indica la velocità di combustione in mm/min). Secondo la norma internazionale UL 94, definita dagli Underwriters Laboratories Inc., il materiale viene classificato come HB se una barretta disposta orizzontalmente dopo 30 secondi di prova alla fiamma non brucia per più di 25.4 mm di lunghezza; come V0 se, dopo un'azione della fiamma ripetuta due volte per 10 secondi ciascuna, presenta postbruciatura < 10 secondi, postincandescenza < 30 secondi, nessuno sgocciolamento, nessuna completa combustione del provino; come V1 se presenta postbruciatura < 30 secondi e altri criteri uguali; come V2 se presenta accensione dell'ovatta sottostante in seguito a gocciolamento. Inoltre, i metodi di prova alla fiamma degli spigoli FH di una barretta disposta orizzontalmente e FV di una barretta disposta verticalmente, secondo la norma tedesca DIN IEC 707 / VDE 0304, corrispondono rispettivamente ai metodi HB e V della norma internazionale UL 94 (Saechtling, 1993, pp. 489-490).
29. In merito ai *pannelli di tamponamento esterni*, particolarmente interessanti sono le esperienze olandesi dell'Arch. Jan Brouwer dal 1985 a oggi (Simonelli, 1992). Di recente, la Elf Atochem ha messo a punto una interessante soluzione per il rivestimento di forni di incenerimento (sperimentata per la prima volta a Ivry in Francia), con pannelli stampati a base di un copolimero polifluoruro di vinildene/ acrilonitrile/butadiene/stirene, studiati per massimizzare il

loro potere riflettente e abbattere così l'impatto ambientale di queste costruzioni (Jagerschimdt, 1994).
30. Per quanto riguarda *i linoleum*, vi è il linoleum tradizionale ottenuto da oli di lino soffiati, il linoleum di nitrocellulosa, il linoleum di caucciù, il linoleum a base di resine alchidiche e il linoleum in polivinilcloruro (PVC) (Maura, 1992, p. 364).
31. Per quanto riguarda l*e coperture trasparenti*, rispetto ai vetri silicatici le materie plastiche utilizzate non si opacizzano ne ingialliscono nel tempo, hanno buona resistenza agli agenti atmosferici e resistenza alla flessione superiore; inoltre, essendo materiali termoplastici possono essere facilmente deformati e sagomati a temperature prossime ai 60° C; il loro principale difetto è l'infiammabilità (Maura, 1992, pp. 366-367; GE Plastics, 1990[2]).
32. Riguardo al *calcestruzzo polimerico*, una applicazione usuale prevede l'aggiunta di polipropilene (PP) (vedi Renzo Piano a Novara, Istituto Sperimentale per i metalli leggeri, nei gradini per la scala interna) come rinforzo; esistono, però, problemi legati ai costi, al galleggiamento delle fibre nell'impasto e alla diminuzione dello "slump". Per questi motivi sono state sperimentate, in sostituzione del polipropilene, aggiunte di poliestere insaturo (Rebeiz, 1995) ottenendo conglomerati più resistenti a compressione, più durabili, con tempi di maturazione da pochi minuti a un'ora.

Capitolo 3
IL RICICLO DI MATERIE PLASTICHE

In questo capitolo, relativo alle esperienze in atto nel campo del riciclo, vengono focalizzate, innanzitutto, le diverse modalità esistenti di riciclo delle materie plastiche (1) (Par. 3.1), modalità che, oltre al recupero nei cicli di produzione degli scarti di processo, comprendono il riciclo meccanico (frantumazione del manufatto e rigranulazione del polimero), il riciclo chimico (produzione del monomero di partenza del polimero trattato), il riciclo energetico (combustione delle materie plastiche per produrre energia termica ed elettrica). In seguito sono approfondite le possibili cause di alterazione dei materiali post-consumo (Par. 3.2) e, in particolare, i concetti riguardanti la degradazione dei polimeri durante la loro lavorazione e il ciclo di vita (Par. 3.2.1), gli effetti delle possibili contaminazioni sui materiali riciclati (Par. 3.2.2), le problematiche relative alla compatibilizzazione di polimeri di natura chimica diversa e di miscele eterogenee provenienti dalla raccolta dei rifiuti solidi urbani (Par. 3.2.3).
L'analisi dello stato dell'arte sul riciclo meccanico (Par. 3.3) viene affrontata considerando la famiglia dei polimeri termoplastici di massa (polietilene - PE, polietilentereftalato - PET, polipropilene - PP, polivinilcloruro - PVC, polistirene - PS) (Par. 3.3.1), dei polimeri termoindurenti (poliuretani - PUR) e dei polimeri fibro-rinforzati (Par. 3.3.2), dei tecnopolimeri termoplastici (polimeri utilizzati nei beni di consumo durevoli dell'industia elettronica, informatica, automobilistica e sportiva) (Par. 3.3.3) e quella delle plastiche eterogenee (raccolta da post-consumo - RSU) (Par. 3.3.4).
Inoltre, le ricerche effettuate presso le aziende e le associazioni impegnate nel settore del riciclo delle materie plastiche in Italia, Francia, Germania, Belgio, Gran Bretagna, Olanda, Stati Uniti, hanno permesso di evidenziare alcuni interessanti utilizzi di materie plastiche riciclate nel settore delle costruzioni (Par. 3.4). Di queste

applicazioni vengono riportate, laddove rese disponibili, le modalità di lavorazione, di utilizzazione e le prestazioni in opera: in particolare, sono considerati i blocchi Stabilobloc per sottofondi stradali (Par. 3.4.1), i profili Timbron per rivestimenti esterni (Par. 3.4.2), il calcestruzzo polimerico (Par. 3.4.3), i serramenti in polivinilcloruro (PVC) (Par. 3.4.4), il riciclo di pneumatici (Par. 3.4.5), gli elementi di copertura (Par. 3.4.6), il polistirene espanso (EPS) (Par. 3.4.7), le barriere foniche (Par. 3.4.8), il polivinilcloruro (PVC) (Par. 3.4.9) e altre applicazioni minori (Par. 3.4.10).

3.1 Le tecnologie di riciclo

Il concetto di riciclo - Il riciclo meccanico, le condizioni necessarie, la raccolta, l'omogeneità e la pulizia, la struttura macromolecolare, gli impianti, la progettazione - Il riciclo chimico, la pirolisi, l'idrogenazione, la gassificazione, la chemiolisi - Il riciclo energetico, l'incenerimento, il combustibile RDF.

Il termine "riciclo" identifica, in generale, l'impiego di un determinato rifiuto come materia prima in settori differenti da quelli originari (2): nel campo delle materie plastiche le tecnologie disponibili per il trattamento dei residui riutilizzabili sono diverse a seconda si parli di "riciclo meccanico", "riciclo chimico" o "riciclo energetico" (3).
Per "riciclo meccanico" si intende il riutilizzo dei residui plastici, opportunamente macinati e granulati (Fig. 30), nella produzione di nuovi manufatti; l'ottimizzazione di questo tipo di opzione è legata ad alcune particolari condizioni:

- da un punto di vista prestazionale, la migliore qualità del prodotto riciclato è funzione sia del livello di degrazione, sia del grado di pulizia e dell'omogeneità dei residui di partenza; ciò non toglie che sia possibile, attraverso l'uso di particolari additivi, ottenere prodotti qualitativamente apprezzabili anche partendo da residui eterogenei (come quelli di provenienza domestica);
- dal punto di vista della struttura macromolecolare dei polimeri, solo i termoplastici sono processabili più volte, mentre i termoindurenti, così come i materiali fibrorinforzati, possono essere solo macinati e impiegati come cariche inerti con materiali riciclati o vergini;
- da un punto di vista impiantistico, sono necessarie infrastrutture finalizzate alla raccolta, allo smistamento e al lavaggio dei rifiuti plastici da utilizzare, tenendo conto dei costi e dell'impatto ambientale di questi processi di lavorazione;
- da un punto di vista produttivo, è necessario garantire una facile disassemblabilità dei manufatti dismessi (Cap. 4, Par. 4.4), e una

corretta identificazione dei materiali attraverso l'utilizzo dei codici SPI (Fig. 31).

Per "riciclo chimico" (4) si intende l'operazione di scomposizione delle molecole dei polimeri, di cui sono costituiti i residui plastici, sia nei rispettivi monomeri di partenza, che possono essere utilizzati per produrre polimeri di pari qualità rispetto a quelli vergini, sia in materie prime di base per l'industria chimica e petrolchimica.

Questo tipo di opzione, molto dispendiosa da un punto di vista energetico, si può applicare solamente alle materie plastiche ottenute per policondenzazione (5), sfruttando la reversibilità di questa reazione; attualmente i processi disponibili sono:

- la pirolisi, cioè la scomposizione dei polimeri attraverso il riscaldamento sottovuoto (500 - 900 °C), con formazione di idrocarburi gassosi o liquidi utilizzabili nelle raffinerie;
- l'idrogenazione, cioè la rottura delle catene polimeriche con idrogeno e calore (300 - 500 °C), con formazione di oli leggeri utilizzabili nelle raffinerie o nell'industria chimica;
- la gassificazione, cioè il trattamento con aria od ossigeno a temperature elevate (superiori ai 1000 °C), con formazione di monossido di carbonio e idrogeno, che possono essere utilizzati nella produzione di metanolo o ammoniaca, oppure nella lavorazione dell'acciaio;
- la chemiolisi, cioè la demolizione dei polimeri in presenza di acqua (idrolisi), glicole (glicolisi) o metanolo (metanolisi) (6), attraverso la quale i poliesteri, i poliuretani e i poliammide sono ricondotti ai monomeri di base.

Per "riciclo energetico" si intende il riutilizzo dei residui plastici come fonte di energia attraverso il loro incenerimento, sfruttando l'elevato potere calorico delle materie plastiche (in media da 30 a 46 MJ/kg, contro i 46 MJ/kg del petrolio e i 25 MJ/kg del carbone). Si tratta dell'opzione di gran lunga più utilizzata nel riciclo dei materiali plastici (7), anche se, da un punto di vista "sostenibile", dovrebbe essere valida solo quando un materiale polimerico non è più utilizzabile da un punto di vista prestazionale e qualitativo. Le diverse opportunità disponibili sono:

- la produzione di energia elettrica e termica con utilizzo di forni inceneritori;
- la sostituzione di combustibili tradizionali con RDF ("Refuse Derived Fuel" - combustibile di derivazione da rifiuti) nei forni per la produzione di cemento (8).

3.2 Degradazione, contaminazione e compatibilità

La degradazione, il riciclo "a cascata", il processo degradativo, la rottura delle catene macromolecolari, l'origine termica, l'origine meccanica, l'origine fotoossidativa, la diminuzione del peso molecolare, la formazione di composti ossigenati, la formazione di catene ramificate e reticolate, l'allungamento a rottura, gli additivi stabilizzanti - Gli effetti delle contaminazioni, la contaminazione superficiale, la contaminazione da additivi, la contaminazione da metalli - La compatibilità, i copolimeri, le miscele eterogenee, le miscele omopolimeriche, l'adesione matrice/dispersione, le proprietà finali, il grado di compatibilità, gli additivi, l'azione fisica, l'azione chimica, le temperature di lavorazione, le miscele eterogenee.

Per affrontare, in maniera esaustiva, le problematiche inerenti il riciclo meccanico dei materiali polimerici, tecnologia che riguarda l'oggetto di questa tesi, non si può prescindere da alcune considerazioni circa i concetti relativi alla degradazione, agli effetti delle possibili contaminazioni e alla compatibilità di questi materiali. Il primo aspetto, la degradazione, permette di far luce su quei processi, riguardanti la lavorazione o il ciclo di vita di un manufatto, che portano a un decadimento delle proprietà di un polimero vergine e che, di conseguenza, ne influenzano il successivo riutilizzo come prodotto riciclato; la conoscenza di questi processi permette, inoltre, di inquadrare nella sua interezza la complessità che investe il tema del riciclo se considerato dal punto di vista del mantenimento di un livello accettabile delle prestazioni chimico, fisiche e meccaniche di un manufatto plastico. Il secondo aspetto, l'effetto delle contaminazioni, risulta determinante quando si trattano materiali che, già in fase di lavorazione, vengono additivati con vari tipi di sostanze che, da un lato, ne agevolano la processabilità e l'uso, ma, nell'ottica di un successivo riutilizzo, diventano possibili fattori di instabilità; ne si può trascurare che gran parte dei materiali plastici durante il loro ciclo di vita sono a contatto con prodotti non chimicamente inerti, dei quali bisogna tener presente i possibili effetti degradativi e ambientali. Il terzo aspetto, la compatibilità, è quello che più impegna le ricerche sulle materie plastiche vergini e riciclate e risulta essere strategicamente determinante, di fronte a evidenti ragioni economiche che impongono di limitare al massimo le operazioni sui materiali riciclati, dove una completa separazione dei diversi polimeri è quasi impossibile o molto dispendiosa; di fatto, e non a caso, molte multinazionali produttrici di polimeri vergini dedicano notevoli risorse nel mettere a punto prodotti che aiutano a miscelare materie plastiche incompatibili.

3.2.1 La degradazione dei materiali polimerici

I processi degradativi interessano le materie plastiche fin dalla loro trasformazione in manufatto: questo aspetto, oltre a sottolineare l'importanza del controllo delle variabili operative durante il processo di lavorazione (9), mette in luce come non si possa pensare di ri-processare infinite volte questi materiali, come per esempio i metalli o il vetro, evidenziando come scelta obbligata quella del cosidetto "riciclo a cascata", limitato a tre/quattro successive trasformazioni, con livelli prestazionali decrescenti. Infatti, i materiali polimerici sono costituiti da lunghe catene, o macromolecole, di monomeri, ottenute con diversi tipi di reazione chimica accomunati dal fatto che, affinché essi avvengano, è necessario fornire loro dell'energia: essendo queste reazioni chimiche reversibili, l'energia necessaria ad accrescere una catena polimerica può, se restituita sottoforma di sollecitazione termica, meccanica o come energia ultravioletta, provocare la degradazione del polimero, attraverso la diminuzione della catena macromolecolare, con conseguente decadimento delle sue proprietà. Dunque, il processo degradativo parte con una reazione di iniziazione che genera la rottura dei legami tra le catene macromolecolari, reazione che può essere di origine termica o meccanica, se riferita alla lavorazione dei materiali, oppure può essere di origine fotoossidativa, se riferita all'esposizione alla luce solare di un manufatto durante il suo ciclo di vita .
In generale, gli effetti che si possono generare sulla struttura di un materiale plastico a seguito della sua degradazione sono (La Mantia, 1995[6], pp. 1-6):

- la diminuzione del peso molecolare del polimero; è l'effetto più evidente, e sempre presente, della rottura delle catene molecolari, le cui conseguenze sono la diminuzione della viscosità (10) e, per variazioni consistenti del peso, la diminuzione del modulo e della tensione a rottura;
- la formazione di composti ossigenati; le catene macromolecolari spezzate possono, in presenza di ossigeno, dar luogo a questo tipo di composti, chimicamente diversi da quelli originari, che rendono molto più veloce e distruttiva la reazione di degradazione, in quanto non più legata alla presenza di una sollecitazione termica o meccanica, ma alla formazione a catena di insaturazioni (11); la formazione di composti ossigenati peggiora la resistenza alla luce e la capacità isolante del materiale e va opportunamente contrastata con additivi antiossidanti;

- la formazione di catene ramificate e reticolate; questo effetto, particolarmente evidente nei polietileni, influisce notevolmente su molte proprietà, in primo luogo sulla lavorabilità del materiale, che può anche risultare nulla per l'aumento della viscosità, sul modulo e la tensione a rottura, che diminuiscono all'aumentare delle ramificazioni.

Il parametro che viene preso come riferimento per la valutazione della degradazione di un polimero è l'allungamento a rottura, anche se occorre sottolineare come esso sia influenzato maggiormente da processi degradativi legati all'esposizione alla luce, processi che generano difetti superficiali che, per la concentrazione degli sforzi, infragiliscono il materiale (La Mantia, 1995[6], p. 7): oltre alle opportune considerazioni circa l'attendibilità di questo parametro nella valutazione di processi degradativi termico-meccanici, questo particolare conferma come l'azione della luce, alla quale i manufatti che vengono riciclati possono essere esposti per tempi molto lunghi, sia da tenere in debita considerazione nelle previsioni prestazionali dei nuovi prodotti.
Nelle operazioni di riciclo, i processi degradativi che intervengono a seguito di sollecitazioni termo-meccaniche sono, in genere, molto più spinti che nei polimeri vergini per l'azione catalizzatrice dei composti ossigenati formatisi durante il ciclo di vita e la lavorazione del materiale. Per questo motivo è necessario eliminare o limitare tali processi con l'aggiunta di additivi stabilizzanti, al fine di evitare gravi decadimenti delle proprietà dei materiali riciclati: questi additivi non sono, in generale, identici a quelli utilizzati per la stabilizzazione dei materiali vergini, ma vengono appositamente formulati (12); un polimero riciclato stabilizzato, oltre a essere protetto durante i processi di trasformazione, risulta essere più resistente ai processi degradativi lungo l'intero suo ciclo di vita, in quanto la degradazione determina una minor resistenza ai raggi ultravioletti.

3.2.2 Gli effetti delle contaminazioni sui materiali di riciclo

La riciclabilità di un materiale polimerico è influenzata dalla presenza di sostanze estraneee, sostanze che aderiscono superficialmente al materiale oppure vi sono disciolte. La presenza di queste contaminazioni va tenuta ben presente sia perché può dare luogo a processi degradativi legati a trasformazioni per effetto del calore e in presenza di ossigeno, sia perché durante le

operazioni di riciclo può dar luogo (durante il riscaldamento per la rigranulazione, durante la combustione o durante il processo di pirolisi) a prodotti tossici tali da creare problemi di igiene o impatto ambientale.
Le contaminazioni presenti in materiale plastico sono di tre tipi (Camino, 1994):

- la contaminazione superficiale; è dovuta all'utilizzo di materiali per imballaggio (che sono circa un terzo del totale degli impieghi delle materie plastiche), che mette a contatto le materie plastiche con prodotti quali detergenti, lubrificanti, solventi e pesticidi, che vengono assorbiti in superficie anche fino al 2 % sul peso del materiale e che possono evaporare durante i processi di riciclo o reagire con il polimero degradato;
- la contaminazione da additivi; questi possono degradarsi durante la fabbricazione o l'impiego di un manufatto, per effetto del calore, della luce o dell'ossigeno, rendendo meno stabile il materiale riciclato rispetto a quello vergine; esistono, poi, particolari famiglie di additivi - i ritardanti di fiamma - presenti in forti concentrazioni (fino al 30 %) che, durante le trasformazioni di riciclo, rilasciano prodotti tossici alogenati;
- la contaminazione da metalli; metalli quali rame, manganese, cobalto e ferro, spesso presenti nei polimeri sottoforma di sali solubili, catalizzano i processi di ossidazione che degradano il materiale: questo aspetto è da tenere in particolare considerazione nei materiali riciclati dove l'azione degli additivi antiossidanti aggiunti al polimero vergine si è generalmente esaurita, e va eliminato con l'utilizzo di additivi complessanti che agiscono da disattivatori dei metalli.

Quindi, indipendentemente dal tipo di riciclo che si sceglie di attuare, è evidente come occorra conoscere in modo approfondito il tipo di materiale da lavorare, la sua composizione e il suo utilizzo, tenendo presente che, con particolare riferimento alle plastiche eterogenee, possono esistere contaminazioni derivanti dal contatto con altri rifiuti in fase di stoccaggio, le quali potrebbero influenzare negativamente le prestazioni del prodotto riciclato.

3.2.3 La compatibilità delle materie plastiche

Il problema della compatibilità tra polimeri diversi (La Mantia, 1995[6], pp. 8-17) si pone nel momento in cui si voglia miscelarli per ottenere nuovi polimeri che presentino proprietà migliori rispetto a quelle di

partenza (Cap. 2, Par. 2.1.2), quando si debbano processare miscele di materie plastiche eterogenee provenienti dalla raccolta dei rifiuti solidi urbani, oppure, quando al polimero vergine si aggiunga il medesimo polimero riciclato (miscele omopolimeriche) che, per effetto di processi degradativi, presenti una struttura cristallina modificata con molecole di forma e grandezza differenti (diverso peso molecolare e presenza di composti ossigenati) (13).
Le proprietà di un mix polimerico (Fig. 32) sono strettamente correlate, infatti, oltre alle proprietà di partenza dei polimeri, all'adesione tra le diverse fasi della miscela e alla dimensione delle particelle del polimero disperso nel polimero matrice (14): quando si miscelano due o più polimeri incompatibili le particelle, a causa della diversa natura chimica che porta le fasi a respingersi, risultano disuniformi e scollate dalla matrice (in modo simile ad una emulsione olio/acqua) (Fig. 33) con la conseguenza che le proprietà finali risultano scarse e, spesse volte, peggiori di quelle dei singoli polimeri.
Di fatto, pochissimi polimeri sono compatibili (Fig 34) e, anche all'interno di una stessa famiglia come quella delle poliolefine, esistono evidenti difficoltà alla miscelazione (Fig. 35) (15): vi sono. comunque, diversi gradi di compatibilità, legati alla polarità e alla cristallinità della macromolecola del polimero.
In questo contesto la funzione degli additivi compatibilizzanti (La Mantia, 1996) (16) è quella di creare un ponte tra le fasi incompatibili, attraverso opportuni gruppi funzionali in grado di comunicare con l'una e con l'altra fase: l'azione del compatibilizzante può essere di tipo fisico, qualora leghi direttamente le diverse fasi come terzo componente (Fig. 36a), oppure di tipo chimico, qualora intervenga una reazione tra i gruppi funzionali dell'additivo che si vanno a innestare sui polimeri modificandone la struttura chimica (Fig. 36b).
Nel primo caso gli additivi sono copolimeri a blocchi le cui due unità monomeriche sono compatibili con ciascuna delle due fasi, mentre nel secondo caso si tratta di copolimeri in cui una unità monomerica sia solubile in una delle due fasi e l'altra contenga gruppi funzionali che possono reagire con quelli dell'altra fase. In entrambi i casi gli effetti conseguiti sono la riduzione dell'energia di interfaccia tra le particelle con conseguente miglioramento dell'adesione e la stabilizzazione della dispersione: si formano cioè dei legami stabili che migliorano, a seconda del tipo di compatibilizzante utilizzato, una o più delle proprietà del mix polimerico quali modulo elastico, tensione a rottura, allungamento a rottura e resistenza all'urto.

Considerando le miscele eterogenee di riciclo, dove la classica miscela proveniente dalla separazione degli RSU è composta da poliolefine (PE, PP), polivinilcloruro (PVC) e polietilentereftalato (PET) (17), al problema dell'incompatibilità chimica si aggiunge quello legato alle differenti temperature di lavorazione dei polimeri presenti: infatti, a 270° C, temperatura di lavorazione del PET, il PVC subisce una forte degradazione, con conseguenti difficoltà di trasformazione e proprietà meccaniche molto modeste.
In questo caso si può decidere di mantenere una miscela non separata, lavorata a temperature intorno ai 210° C (quindi utilizzando il PET come riempitivo e contenendo la degradazione del PVC), per produrre, con tecnologie appositamente studiate, manufatti di grosse dimensioni, per compensare le minori proprietà meccaniche, oppure si può separare la frazione leggera (le poliolefine) da quella di densità maggiore (PVC e PET), lavorandole separatamente nelle condizioni più adatte e miscelandole successivamente in modo da creare una matrice poliolefinica con la frazione pesante usata come riempitivo; nella seconda soluzione le proprietà meccaniche del materiale risultano migliori, anche in seguito all'aggiunta di additivi e lubrificanti (18).

3.3 Il riciclo meccanico: lo stato dell'arte

I termoplastici, le poliolefine, i polietileni (LLDPE, LDPE, HDPE) e il polipropilene (PP), i processi degradativi termomeccanici e fotoossidativi, la variazione delle proprietà meccaniche, il riciclo omogeneo, il polivinilcloruro (PVC), la sensibilità al calore, gli effetti della degradazione, l'azione degli additivi stabilizzanti, il riciclo omogeneo, il polietilentereftalato (PET), la depolimerizzazione, l'azione dell'umidità, il riciclo omogeneo, il polistirene (PS, EPS, XPS), la stabilità termomeccanica, i problemi economici - I termoindurenti, i poliuretani (PUR), i manufatti fibro-rinforzati (BMC, SMC), i processi, il riciclo come carica e rinforzo - I tecnopolimeri termoplastici, la degradazione, il settore automobilistico, i "compact discs", gli scarponi da sci, i "computers" e le fotocopiatrici - Le miscele eterogenee, le operazioni, la separazione, la matrice poliolefinica, la miscela tipo, le caratteristiche meccaniche, la lavorabilità, le applicazioni.

Alla luce delle considerazioni fatte nei precedenti paragrafi è possibile effettuare una sintesi delle attuali conoscenze inerenti il riciclo meccanico delle materie plastiche: le tecnologie attualmente usate permettono il riciclo di materiali termoplastici, sia in forma omogenea (in gran parte con scarti provenienti dai processi di trasformazione e lavorazione dei polimeri stessi) che in forma eterogenea (per quanto concerne le plastiche provenienti dalla raccolta post-consumo), di materiali termoindurenti, generalmente utilizzati come matrice in manufatti compositi fibro-rinforzati (in particolare nel settore automobilistico), di tecnopolimeri (provenienti dalla dismissione di prodotti di consumo di lunga durata quali, a esempio, i "personal computers"). In questo modo si vuole fornire un quadro generale e orientativo sullo stato dell'arte nel campo del riciclo meccanico, non potendo, per la vastità del problema, riportare tutte le applicazioni e le ricerche in corso sui materiali riciclati: dunque, un approccio di tipo qualitativo che passa attraverso l'analisi dei processi degradativi (nel caso di quei polimeri che vengono riutilizzati come materia seconda), dei principali problemi legati alle operazioni di riciclo e delle effettive applicazioni di cui è possibile definire chiaramente un mercato attivo e organizzato.

3.3.1 Il riciclo dei polimeri termoplastici

I polimeri termoplastici di massa, per i volumi di produzione attuali, costituiscono in prevalenza l'oggetto delle operazioni di riciclo (La Mantia, 1995[6]): a questa famiglia appartengono i polietileni (LLDPE,

LDPE, HDPE), il polipropilene (PP), il polivinilcloruro (PVC), il polietilentereftalato (PET) e il polistirene (PS, EPS, XPS).
Per quanto concerne le prime due categorie di polimeri, i processi degradativi termomeccanici sono particolarmente severi per il polipropilene (PP), mentre quelli fotoossidativi lo sono per i polietileni (PE): tra gli effetti di queste degradazioni convivono la riduzione del peso molecolare, e quindi l'aumento della viscosità, e la formazione di ramificazioni e reticolazioni che, in particolare per il polietilene lineare a bassa densità (LLDPE), accentuano la diminuzione delle proprietà meccaniche.
In generale, le trasformazioni durante il processo di riciclo comportano per le poliolefine una diminuzione dell'allungamento a rottura e della resilienza rispetto ai valori del materiale vergine (19), per la maggiore rigidità indotta dalle reticolazioni, mentre la tensione a rottura e il modulo di elasticità non variano (Fig. 37 e Fig. 38).
Le applicazioni di materiale riciclato omogeneo più diffuse sono:

- per il polipropilene (PP), la miscelazione con materiale vergine, tenuto conto che la forte incompatibilità tra quest'ultimo e il materiale riciclato impone di limitarne al minimo le aggiunte, al fine di mantenere valori di proprietà meccaniche ammissibili;
- per i polietileni (PE), la realizzazione di contenitori per detergenti, attraverso la coestrusione di uno strato di materiale riciclato tra due di polimero vergine, oppure la realizzazione di profilati o di sacchi per la raccolta dei rifiuti solidi urbani.

Per quanto riguarda il polivinilcloruro (PVC), si tratta di un polimero molto sensibile al calore (Fig. 39) che, già a 200° C, si degrada con formazione di composti a basso peso molecolare, effetto che diventa molto spinto in un campo di temperatura compreso tra i 220° C e i 280° C e per tempi lunghi di lavorazione (20); inoltre, le sollecitazioni meccaniche, alle quali il polimero viene sottoposto durante il processo di trasformazione, possono, alle basse temperature, accentuarne la degradazione: per effetto di questi processi nel polivinilcloruro (PVC) si formano geli insolubili e infusibili che peggiorano la sua lavorabilità e le sue proprietà meccaniche. Grazie all'efficace protezione degli additivi stabilizzanti (21) utilizzati nella lavorazione del polimero vergine, le trasformazioni durante il processo di riciclo del polivinicloruro (PVC) non comportano, però, se si opera in condizioni non troppo severe, effetti degradativi sulla sua struttura e sulle sue proprietà meccaniche (Fig. 40 e Fig. 41). Le applicazioni di materiale riciclato omogeneo più diffuse sono:

- nel settore edile, prevalentemente per la produzione di tubi rigidi, per il drenaggio di acque e fognature, e di raccordi e manicotti per tubazioni;
- nel settore elettrico (22), per condutture di protezione di cavi elettrici e telefonici.

Per quanto riguarda il polietilentereftalato (PET), in presenza di acqua e ad alta temperatura, depolimerizza, a causa della reversibilità della reazione di policondensazione dalla quale esso deriva: anche in presenza di modeste quantità di umidità e per brevi tempi di lavorazione, il polimero può essere soggetto a forti degradazioni il cui effetto principale è la formazione di composti a basso peso molecolare (diminuiscono la viscosità, l'allungamento a rottura, la tensione a rottura e la resilienza; aumenta il modulo elastico) (23) (Fig. 42 e Fig. 43).

L'azione dell'umidità condiziona in misura notevole le operazioni di riciclo, le quali, per motivi di economia, devono prescindere da lunghe e costose fasi di essicamento.

Di fatto, è possibile mantenere le proprietà meccaniche del polimero su livelli accettabili solo per due estrusioni, anche se, la sua l'estrema versatilità di lavorazione ne permette l'utilizzo in trasformazioni che richiedono viscosità inferiori (24).

I manufatti prodotti in maggiore quantità con questo tipo di materiale riciclato omogeneo sono:

- fibre tessili; si tratta di fibre per tappeti, per palle da tennis, per tessuti non tessuti, per abbigliamento - Terital Eco della Montefibre (AA.VV., 1995[8]);
- flaconi per uso non alimentare; viene miscelato con materiale vergine o coestruso tra due strati di polimero vergine, per ottenere contenitori per detergenti.

Per quanto riguarda, infine, il polistirene (PS, EPS, XPS), si tratta di un polimero che presenta una notevole stabilità alle sollecitazioni termomeccaniche (Fig. 44), stabilità che diminuisce a temperature elevate e in presenza di ossigeno.

Per questo motivo il polistirene (PS) si presta al riciclo meccanico, purché le condizioni di lavorazione non siano particolarmente severe, con impieghi del materiale riciclato omogeneo identici a quelli da cui deriva: in questo caso, il problema maggiore non è tanto l'entità del processo degradativo, quanto l'incidenza dei costi di trasporto, soprattutto nel caso del polistirolo espanso (EPS, XPS) (Par. 3.4.7).

3.3.2 Il riciclo dei polimeri termoindurenti

I polimeri termoindurenti costituiscono solo una piccola percentuale, rispetto a quelli termoplastici, sul totale dei consumi complessivi di materie plastiche. Sulla spinta di recenti disposizioni legislative (25), produttori e consumatori di materiali termoindurenti hanno indirizzato le loro ricerche industriali sul riciclo meccanico di polimeri quali i poliuretani (PUR) (ICI Polyurethanes, 1994) e alcune resine utilizzate come matrice in manufatti fibro-rinforzati, tra le quali il poliestere (UP), le resine fenolo - formaldeide (PF) e le resine epossidiche (EP) (Bledzki, Goracy, 1995). In entrambi i casi, non essendo, per definizione, i polimeri termoindurenti riprocessabili, sono stati studiati dei processi industriali che, attraverso diversi stadi di macinazione, recuperano il polimero, sottoforma di polvere, e le fibre di rinforzo.
Dopo la separazione il polimero viene utilizzato come carica nelle lavorazioni originali, in sostituzione delle cariche solitamente usate, mentre le fibre di rinforzo sono impiegate come normali materiali di rinforzo.
A differenza dei materiali termoplastici, dove risulta determinante il livello degradativo del materiale riciclato, nel caso dei materiali termoindurenti è necessario valutare l'effetto che l'aggiunta di materia di riciclo ha sulle proprietà del polimero vergine: alcune ricerche effettuate (Butler, Gruskiewicz, 1995) hanno dimostrato come il materiale rigranulato sia insensibile alla presenza di contaminazioni tipiche dei manufatti compositi (per esempio le vernici), mentre risente della morfologia e della distribuzione dimensionale dei granuli.
In generale, le proprietà meccaniche dei manufatti ottenuti da materiale riciclato sono determinate dal polimero vergine e, quindi, non risentono in modo evidente, per aggiunte contenute, della presenza di materiale di riciclo: in particolare diminuiscono i valori di resistenza a trazione - flessione e la resilienza, mentre rimangono invariati il modulo elastico a trazione - flessione e l'allungamento a rottura.
Per quanto concerne il processo di riciclo, vengono lavorati semilavorati rinforzati con vetro, circuiti stampati e componenti di autoveicoli. Il processo consiste essenzialmente di tre fasi (Leibold, 1994) (Fig. 45):

- la separazione delle parti metalliche contenute nei manufatti riciclati, già ridotti in fase di raccolta in piccole pezzature (50 mm) e la loro macinazione fine;

- il frazionamento e l'essicamento del materiale così ottenuto;
- la setacciatura in diverse frazioni contenenti solo polveri o polveri miste a fibre di rinforzo.

Le frazioni di materiale riciclato sono utilizzate per diversi impieghi, in relazione alla loro dimensione e alla presenza di fibre di rinforzo e impurezze colorate (Valente, et alii, 1995, p. 182):

- come carica in manufatti compositi del tipo BMC ("Bulk Moulding Compound") e SMC ("Sheet Moulding Compound"), nel caso si ottenga un macinato a granulometria media non superiore a 100 micron;
- come rinforzo, nel caso venga effettuata una separazione tra fibre e l'insieme resina e inerte;
- come semplice carica in varie applicazioni (carica in asfalti per tetti di abitazione, aggregato per calcestruzzi, rinforzo per materiali termoplastici, carica in bitumi stradali) qualora la granulometria sia superiore a 1 mm;
- come carica nella realizzazione di schiume poliuretaniche (per le polveri poliuretaniche ottenute dalla macinazione di sedili di autoveicoli).

Tra i manufatti compositi ottenuti utilizzando materiale riciclato si possono citare alcune interessanti applicazioni nel settore automobilistico quali i pannelli interni per la chiusura del motore nel "van", i fari anteriori, i coperchi per valvole di motore a scoppio, i paraurti (realizzati come struttura "sandwich" con materiale vergine), l'involucro antirumore della Polo e l'alloggiamento della ruota di scorta dell'Audi 100.

3.3.3 Il riciclo di tecnopolimeri

I tecnopolimeri termoplastici costituiscono circa il 20 % della produzione totale di materie plastiche e, rispetto ai polimeri di massa, presentano volumi di materiale riciclato nettamente inferiori, anche a causa dei tempi di vita molto più lunghi dei manufatti da essi costituiti: l'elevato livello prestazionale (caratteristiche quali stabilità dimensionale, leggerezza, resistenza meccanica, resistenza alle alte temperature e agli agenti chimici, rimangono insuperabili anche nei materiali riciclati) e gli alti prezzi di vendita di questi polimeri ne rendono, però, conveniente e interessante il riciclo.

Le attuali opzioni di riciclo meccanico per i tecnopolimeri prevedono processi di macinazione e rigranulazione, con il successivo impiego

in miscela con polimero vergine: le miscele così ottenute sono commercializzate direttamente dalle aziende produttrici e utilizzate come materie prime per applicazioni di minore livello prestazionale (26).
Tra i tecnopolimeri normalmente riciclati, a parte la poliammide (PA) che risulta sensibile alla presenza di umidità e, quindi, denota processi degrativi durante le operazioni di riciclo, e a parte i materiali fibro-rinforzati, dove la diversa disposizione delle fibre nel materiale rigranulato determina minori proprietà meccaniche, in generale, non si presentano evidenti decadimenti nei valori di modulo elastico, di resistenza a flessione e di resistenza all'urto alle basse temperature, anche considerate le percentuali di miscela con polimero vergine che sono nell'ordine del 25 - 30 %.
Uno dei settori in cui trovano largo impiego i tecnopolimeri è quello automobilistico, ed è in questo settore che si sono concentrate le ricerche di alcune multinazionali produttrici di polimeri (Bayer, Huls, SNIA).
Tra le varie applicazioni di materiale riciclato sinora sviluppate, si possono citare (27) (Fregola, et alii, 1994):

- i rivestimenti di longheroni per la BMW Serie 3, realizzati con miscele di polibutilentereftalato e policarbonato (PBT + PC) ricavati da paraurti riciclati;
- i convogliatori d'aria, realizzati con poliuretani rigidi (TPU) provenienti da rivestimenti di paraurti e pannelli protettivi laterali;
- le griglie in acrilonitrile/butadiene/stirene (ABS) per i radiatori Volkswagen, contenenti fino al 30 % di materiale riciclato proveniente da vecchie griglie (Fig. 46);
- il telaio del radiatore della Mercedes, con poliammide rinforzata con fibra di vetro (PA6 + FV), proveniente dalla macinazione di schienali di sedili di pullman.

Per quanto riguarda gli altri settori d'impiego esistono diverse modalità di recupero quali:

- il riciclo di "compact discs" in policarbonato (PC) (scarti di produzione e resti invenduti), che vengono separati dall'alluminio, dalla lacca e dalla vernice di stampa, per fornire nuovo materiale omogeneo che ha caratteristiche molto prossime a quello originario (Fig. 47);
- il riciclo di scarponi da sci (Nordica), realizzati con poliuretano rigido termoplastico (TPU) e poliammide (PA), che vengono macinati per ottenere materiali omogenei utizzati per salvatacco (TPU) e inserti per zeppe (PA);

- il riciclo di carcasse di "computers", per realizzare miscele di policarbonato (PC) e di acrilonitrile/butadiene/stirene (ABS) contenenti il 25 % di materiale riciclato, con le quali si realizzano carcasse di "computers", "monitors" e macchine elettroniche (28);
- il riciclo di carcasse di fotocopiatrici (OCE), per realizzare manufatti per l'edilizia e per l'automazione d'ufficio in polifenilossido (PPO) (Fig. 48 e Fig. 49).

3.3.4 Il riciclo di miscele eterogenee

Il riciclo meccanico di miscele di polimeri termoplastici indifferenziati (Fig. 50) è una delle strategie adottate per lo smaltimento dei rifiuti plastici, in particolare i contenitori per liquidi provenienti dalla raccolta differenziata, o da successive operazioni di separazione, dei rifiuti solidi urbani.
Occorre precisare che non tutta la frazione di materiale plastico così raccolta viene processata come miscela eterogenea ma solo quella parte (tra il 20 e il 50 %) che, durante le operazioni di lavaggio e separazione dei contenitori, non può essere suddivisa in famiglie omogenee.
Infatti, i problemi di compatibilità e degradazione legati alla lavorazione di polimeri che presentano strutture nettamente differenti (polietilene - PE, polietilentereftalato - PET e polivinilcloruro - PVC) (Par. 3.2.3) fanno preferire, fin dove possibile, trasformazioni di materiale omogeneo. Per i medesimi motivi, il principio sul quale si basano le tecniche di lavorazione di queste miscele è quello di usare un polimero termoplastico (polietilene - PE o polivinilcloruro - PVC) come matrice alla quale sono aggiunti, come carica inerte opportunamente polverizzata, il polietilentereftalato (PET), le resine termoindurenti e le altre resine termoplastiche presenti in frazioni minori (polistirene - PS, polipropilene - PP).
In generale, una miscela che presenti buone caratteristiche estetiche e meccaniche deve avere un contenuto minimo di poliolefine intorno al 50 % (29): dato che, invece, la composizione media dei rifiuti plastici proveniente dagli RSU vede il polietilentereftalato (PET) presente al 55 % e le poliolefine al 30 % circa, è necessario tagliare queste miscele con materiale omogeneo (film di polietilene a bassa densità - LDPE - provenienti da settori industriali e commerciali), cercando, tra l'altro, di contenere il

polivinilcloruro (PVC) entro il 10 %, onde evitare difetti estetici legati alla sua degradazione termomeccanica. Le miscele così ottenute sono impiegate per la produzione di profili che presentano sezioni circolari, quadrate e rettangolari di dimensioni consistenti, per compensare, in termini di coefficienti di sicurezza, le scarse proprietà meccaniche (Tab. 14): comunque, sia le proprietà meccaniche che la lavorabilità (30) di queste miscele possono essere significativamente migliorate, incidendo, però, sui costi, tramite l'utilizzo di additivi stabilizzanti, lubrificanti e compatibilizzanti (31).

Tab. 14 Principali proprietà meccaniche della serie Replex (plastica eterogenea)
Si evidenziano i valori di alcune proprietà meccaniche di un materiale eterogeneo di riciclo prodotto dalla ditta RPE di Parma, unica ditta in Italia, insieme alla R.Eco.Plast di Montemurlo (FI), ad avere una produzione continuativa e competitiva con questo materiale (RPE, 1996).

	Replex "E"	Replex "V"
Resistenza a trazione (N/mm^2)	10 - 15	20 - 25
Allungamento a rottura (%)	8	3
Modulo elastico a flessione (N/mm^2)	500	1500
Resilienza (KJ/m)	25 - 35	20 - 30

I profili, che per applicazioni strutturali vengono armati internamente, sono utilizzati per realizzare manufatti che possono essere destinati alla fornitura di privati o pubbliche amministrazioni. Le principali applicazioni sono (Fig. 51):

- arredo urbano (panchine, segnaletica, fioriere, cestini gettacarta, porta-biciclette, campane per la raccolta differenziata RSU);
- pavimentazioni per percorsi, parcheggi e per l'industria zootecnica;
- recinzioni industriali e agricole;
- attrezzature per giardini (grigliati modulari, gazebi, ringhiere e parapetti);
- parchi giochi;
- pontili e approdi (tavolati e pali).

3.4 Il riciclo delle materie plastiche nel settore delle costruzioni

I sottofondi vibro-assorbenti, la composizione, le caratteristiche e le prestazioni, le applicazioni - I laminati per rivestimenti esterni, la produzione, la comparazione con le essenze legnose - Il calcestruzzo polimerico, gli additivi anti-ritiro, le proprietà meccaniche, le prestazioni, i vantaggi economici, le prove - I serramenti, il processo, le applicazioni - Il riciclo di scarti di pneumatici, i problemi ambientali, il riciclo omogeneo, i manufatti, i blocchi con cls, le pavimentazioni con cls - Gli elementi di copertura, i tipi di manufatti, la posa in opera, la durabilità, la leggerezza, l'economicità - Il riciclo di polistirene espanso (EPS), gli impieghi come additivo per terreni, alleggerimento per cementi e intonaci, isolante e drenante - Le barriere foniche, la struttura, gli elementi, l'assemblaggio - Le applicazioni varie di polivinilcloruro (PVC) riciclato - Gli altri impieghi.

Il settore delle costruzioni rappresenta, per il volume dei consumi, il maggiore consumatore, dopo il settore dell'imballaggio, di materie plastiche (32): appare logico, quindi, che il campo edilizio sia uno dei preferiti per sperimentare applicazioni di materiali plastici riciclati, anche in riferimento al livello prestazionale e al tempo di vita dei componenti e dei materiali abitualmente utilizzati in questo settore (Cap. 1, Par. 1.2).
Gli esempi, di seguito citati, sono significativi della capacità di riciclo del settore delle costruzioni e, anche se a volte non vanno oltre la pura sperimentazione, e pur con volumi di materiale trattato limitati rispetto alle reali esigenze di smaltimento, rappresentano, comunque, uno stimolante substrato di cultura materiale, dal quale possono nascere valide opzioni relative all'utilizzo di materie plastiche riciclate in edilizia.

3.4.1 Stabilobloc

Stabilobloc (1996[2]) è il marchio registrato con il quale vengono prodotti e commercializzati da una azienda belga (33) blocchi di dimensione variabile (Fig. 52) (dimensioni standard base 120 cm x 80 cm, altezza 50 cm), ottenuti dalla semplice compressione di rifiuti plastici indifferenziati, e utilizzabili come sottofondo vibro-assorbente in svariate applicazioni (finora in numerose strade francesi e belghe) (Fig. 53 e Fig. 54) (34). Senza dubbio si tratta di una interessante applicazione che utilizza una tecnologia semplice ed economica (esente da operazioni di separazione, lavaggio ed essicamento) in un campo, quello della lavorazione delle plastiche eterogenee, dove spesse volte i costi rappresentano la principale

limitazione; inoltre, si offre una soluzione "sostenibile" al problema della stabilità dei terreni di sottofondazione, generalmente risolto con riempimenti di aggregati di varia granulometria, la cui movimentazione è operazione onerosa e difficoltosa. In base alla composizione dei rifiuti utilizzati (contenitori per liquidi, film, scarti industriali) sono prodotti (35) due tipi di blocchi:

- blocchi composti da bottiglie di polivinilcloruro (PVC) e polietilentereftalato (PET), utilizzati nella costruzione di strade su terreni argillosi e limosi (comprimibili) e su versanti instabili, e per realizzare pareti drenanti (sono permeabili in qualunque direzione);
- blocchi composti da mix di film plastici (imballaggi e film agricoli), utilizzati solo nella costruzione di strade (sono permeabili solo in direzione dell'altezza).

Le caratteristiche e le prestazioni dei blocchi sono:

- densità molto bassa (in media 0.5 kg/cm^3) (4/12 volte meno dei normali riempimenti di sottofondo) e, quindi, leggerezza (caricano poco terreni a bassa capacità portante) e maneggevolezza;
- indeformabilità trasversale (coefficiente di Poisson quasi nullo, inferiore a 0.13 nei blocchi ricavati da bottiglie) e incompressibilità;
- capacità di distribuzione dei carichi e di assorbimento delle spinte e delle vibrazioni (36);
- stabilità a lungo termine; ai prodotti chimici (solventi, idrocarburi, ecc.), agli sbalzi termici (da - 50° C a + 80° C), ai carichi (scorrimento viscoso sotto carico costante di 0.5 N/mm^2 per 10 anni, pari al 7.3 %);
- modulabilità e assemblabilità (tramite i fori preformati) (Fig. 55);
- capacità drenante (un blocco di densità 0.21 kg/cm^3 presenta una porosità aperta del 65 %, e un coefficiente di permeabilità k = 1×10^{-1} m/s).

3.4.2 Timbron

Timbron (1996[2]) è il marchio registrato con il quale viene prodotta e commercializzata da una azienda inglese (37) una serie di profili laminati ottenuti per estrusione partendo da polistirene (PS) di riciclo (scarti di produzione), profili utilizzati per il rivestimento esterno di edifici (Fig. 56 e Fig. 57). Si tratta di una applicazione che sfrutta il potere termoisolante del polistirene (PS) per la coibentazione degli edifici offrendo, inoltre, migliori caratteristiche di durabilità e manuntenibilità rispetto al legno. I profili, che, da un punto di vista concettuale, riprendono il sistema di montaggio per incastro dei comuni listelli perlinati in legno, riproducono visivamente l'effetto e il colore delle venature di alcune essenze legnose (38) e hanno larghezza variabile tra 100 mm e 300 mm e spessore di 7.5 mm (sono previsti profili angolari di finitura); inoltre, grazie all'aggiunta durante la lavorazione di additivi ritardanti di fiamma, può esserne garantita la resistenza al fuoco (classe 2, metodo BS476 Parte 7). Le proprietà meccaniche dei profili Timbron (Timbron, 1996[1]) sono state comparate a quelle delle comuni essenze legnose utilizzate per rivestimenti esterni (Tab. 15), evidenziando rispetto a queste:

- migliore resistenza a compressione; in particolare i valori di resistenza decrescono del 30 % passando da -20° C a +40° C (72 N/mm^2 contro 54 N/mm^2 per profili rifiniti), sono maggiori del 50 % su profili rifiniti superficialmente e se misurati in direzione parallela a quella di estrusione rispetto alla direzione perpendicolare; il modulo elastico a compressione, nello stesso range di temperature, varia da 1870 N/mm^2 a 1620 N/mm^2 (per profili rifiniti);
- migliore resistenza a trazione;
- minor resistenza a flessione; in particolare i valori di resistenza decrescono del 10 % passando da -20° C a +40° C (61 N/mm^2 contro 55/mm^2 per profili rifiniti) e sono maggiori del 50 % su profili rifiniti superficialmente; il modulo elastico a flessione, nello stesso range di temperature, varia da 2680 N/mm^2 a 2300 N/mm^2 (per profili rifiniti);
- resistenza all'urto simile; nel caso del polistirene, però, le deformazioni sono molto maggiori rispetto al legno.

Tab. 15 Principali proprietà meccaniche dei profili estrusi Timbron e delle comuni essenze legnose utilizzate per rivestimento esterno

Si evidenziano i valori medi di modulo elastico a flessione in N/mm²(A), resistenza a flessione in N/mm² (B), resistenza a trazione in N/mm² (C), resistenza a compressione parallela alla direzione di estrusione o alle fibre in N/mm² (D) e perpendicolare in N/mm² (E), misurati su provini di polistirene (PS) utilizzato per i profili estrusi della serie Timbron, comparati con quelli di alcune comuni essenze legnose normalmente usate per realizzare rivestimenti esterni di edifici (Timbron, 1996[1], p. 9).

	A	B	C	D	E
Timbron	2430	60	18.3	57	21
Frassino	9400	88	5.1	24	4
Tiglio	10100	60	2.4	15	1.2
Betulla	13900	114	6.3	23	3
Quercia	10300	75	3.5	21	4
Cedro	7700	52	1.5	31	3.2
Abete Duoglas	13400	85	2.3	50	5.5
Abete Bianco	10300	68	2.1	40	3.7

3.4.3 Calcestruzzo polimerico con materiali riciclati (PET e HDPE)

L'impiego di materiali polimerici vergini in miscela con calcestruzzo è operazione abbastanza frequente (Cap. 2, Par. 2.5): alcune ricerche hanno sperimentato le possibilità di impiego di fibre di polimeri di riciclo come additivi per calcestruzzo, in particolare polietilene ad alta densità (HDPE) e polietilentereftalato (PET), entrambi provenienti dal recupero di contenitori per liquidi.

Nel primo caso, sperimentato presso l'Università del North Caroline a Charlotte (Flynn, 1994, pp. 525-534) sono state aggiunte al cemento portland fibre di polietilene ad alta densità (HDPE) riciclato, di lunghezza compresa tra 19 e 38 mm, in funzione di additivo anti-ritiro; il campione così ottenuto è stato confrontato con un analogo campione additivato con fibre di polipropilene (PP) vergine (polimero usualmente impiegato per i medesimi scopi nel calcestruzzo).

Per quanto concerne la lavorabilità della miscela, in confronto a un campione non additivato, le fibre di polietilene ad alta densità

(HDPE) hanno mostrato, rispetto a quelle di polipropilene (PP), una minore tendenza a migrare verso la superficie durante la maturazione del provino (risparmio sui trattamenti di finitura superficiale) e, inoltre, influenzano in misura inferiore la consistenza del calcestruzzo (risparmio di additivi plasticizzanti).
Sui diversi provini (controllo, additivato vergine, additivato riciclato) sono state effettuate prove di resistenza a compressione (Fig. 58), a flessione (Fig. 59) e a trazione (Fig. 60) (39): a parità di azione anti-ritiro, il provino contenente lo 0.1 % di fibre di polietilene ad alta densità (HDPE) ha evidenziato le migliori prestazioni meccaniche.
Nel secondo caso, studiato presso il Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale del Lafayette College di Easton (Rebeiz, 1995, pp. 8-12), il polietilentereftalato (PET) riciclato è stato impiegato per la produzione di resine poliesteri insature (UP) (40), successivamente utilizzate per realizzare del calcestruzzo polimerico (41).
Le tecnologie di riciclo, in questo caso, riguardano le operazioni a monte dell'applicazione nel settore edilizio, cioè la preparazione della resina poliestere insatura (PU): per il resto, la miscelazione di questo tipo di resina con calcestruzzo è una applicazione già abitualmente utilizzata, in virtù delle ottime proprietà meccaniche e della elevata durabilità dei conglomerati così ottenuti.
Comunque, la fattiva possibilità di utilizzare materiali riciclati in queste applicazioni rappresenta una soglia importante, perché incide sulla principale limitazione all'uso di resine insature nel calcestruzzo, quella economica. Le prove condotte su provini realizzati con materiale riciclato (per quanto riguarda la parte aggregato composti da 10 % resina, 45 % ghiaietto, 32 % sabbia, 13 % ceneri volanti) hanno evidenziato proprietà comparabili con quelle ottenute utilizzando polimeri vergini; in particolare:

- l'ottima resistenza a compressione e all'abrasione;
- il basso assorbimento d'acqua (< 1 % in peso);
- l'ottima resistenza agli acidi e ai solventi.

3.4.4 Serramenti in polivinilcloruro (PVC)

Il primo e unico impianto, in Europa (42), per il riciclo di serramenti in polivinilcloruro (PVC), è entrato in funzione durante il 1994 a Behringen in Germania (43) (AA.VV, 1995[3], pp. 58-61). L'impianto, la cui capacità operativa è stimata in 12000 tonnellate/anno, è strutturato in modo tale che, partendo dalla frantumazione dei

serramenti (Fig. 61), si separano, per successive vagliature, le frazioni metalliche, vetrose e gommose, ottenendo un recupero pari al 98 % del polivinilcloruro (PVC) contenunto nei manufatti: il grado di purezza di questo materiale riciclato, separato in frazioni bianche e colorate con 4 granulometrie differenti, è molto elevato, tanto da poterlo riutilizzare anche per produrre nuovi profili. A tale riguardo, va sottolineato che solo il materiale bianco può essere riutilizzato per produrre profili (fino all'80 % in contenuto di materiale riciclato), generalmente profili secondari quali fermavetri, stipiti e falsi telai, mentre quello colorato viene incorporato internamente, mediante coestrusione con uno strato esterno di polimero vergine; il materiale riciclato può essere utilizzato per realizzare tubazioni, elementi di arredo, pannelli (Fig. 62).

3.4.5 Riciclo di pneumatici

Esistono diverse applicazioni di gomme provenienti dal riciclo di pneumatici per autoveicoli, scarti che rappresentano il principale rifiuto a livello mondiale e costituiscono un serio problema per le difficoltà di smaltimento legate alla loro voluminosità, alla tendenza all'autocombustione e alla proliferazione di insetti e roditori, che all'interno di questi materiali dismessi trovano un habitat ideale (Baglioni, et alii, 1994, p. 499). La Vredestein Rubber Recycling (1996) di Maastricht opera da diversi decenni nel riciclo di gomma, proveniente principalmente da scarti di lavorazione e da camere d'aria di pneumatici (Fig. 63), scarti dai quali, dopo polverizzazione, purificazione e rigenerazione (Fig. 64), si ottiene gomma in polvere successivamente utilizzata come materia prima per produrre i manufatti originari (pneumatici, tappetini e articoli tecnici) (44).
Per quanto concerne le applicazioni di questo tipo di gomma riciclata, si possono citare quelle relative all'aggiunta in bitume per manti stradali, alla produzione di lastre per pavimentazione (Fig. 65) e di pareti fono-isolanti.
Uno studio, condotto presso la Facoltà di Architettura del Politecnico di Milano (Baglioni, et alii, 1994, pp. 499-505), ha evidenziato la possibilità di inglobare pneumatici interi in blocchi di calcestruzzo armati (45) utilizzabili per pavimentazioni per esterno (dimensioni 75 cm x 75 cm x 22 cm) (Fig. 66), oppure di realizzare blocchi in calcestruzzo armato (dimensioni 120 cm x 120 cm x 200 cm), contenenti come alleggerimento un'anima di gomma pressata

(Fig. 67), utilizzabili per pareti di protezione e per pareti di contenimento lungo fiumi e litorali marini.

3.4.6 Elementi di copertura in polifenilossido (PPO) riciclato

La GE Plastics, multinazionale produttrice di polimeri, ha realizzato una serie di elementi di copertura per edifici con polifenilossido (PPO) contenente circa il 52 % di materiale riciclato (GE Plastics, 1995[1]) (46). Questi elementi, prodotti per stampaggio a iniezione, riproducono, da un punto di vista estetico, la venatura del legno di cedro (Fig. 68 e Fig. 69) o la tegola spagnola (Fig. 70 e Fig. 71): il vantaggio rispetto agli usuali elementi di copertura sta:

- nella velocità di posa in opera (ogni elemento riproduce 28 assicelle di cedro o 12 tegole spagnole, consentendo di ridurre i punti di aggancio alla falda della copertura; inoltre, gli elementi sono concepiti per agganciarsi tra loro, garantendo stabilità alla copertura);
- nella leggerezza (il peso è circa 4 kg/m^2 contro i 15 kg del cedro e i 33 delle tegole);
- nella resistenza agli agenti atmosferici (il polifenilossido - PPO - protegge la propria superficie formando una patina di materiale ossidato, di colore giallognolo che è considerata esteticamente accettabile) (Leaversuch, 1995, p. 38).

Per quanto riguarda le prestazioni meccaniche degli elementi di copertura in materia plastica, essi garantiscono una elevata resistenza all'urto (resistono al peso di un uomo) e sopportano raffiche di vento fino a 290 km/orari; inoltre, grazie a opportune additivazioni, il materiale risulta autoestinguente In alcune applicazioni gli elementi "finto legno" sono stati utilizzati come rivestimento esterno di edifici prefabbricati (Fig. 72).

3.4.7 Riciclo di polistirene espanso (EPS)

Il riciclo del polistirolo, o polistirene, espanso (EPS) (Fabiani, 1994) è influenzato dal fatto che la maggior parte del volume (98%) dei manufatti costituiti da questo materiale è costituita da aria: da ciò deriva che, sotto il profilo economico, i costi delle operazioni di riciclo, influenzati in maniera notevole dal trasporto del materiale dismesso, ne rendono improponibile il recupero come materia prima. Più conveniente appare, l'utilizzo del materiale riciclato

espanso dopo sola macinazione o frantumazione (47); così trattato il polistirene espanso di riciclo viene impiegato, per quanto concerne il settore delle costruzioni, come (Fig. 73):

- agente drenante o riempitivo nei terreni (vengono formate delle fessure di materiale espanso che convogliano le acque attraverso gli strati impermeabili del terreno stesso) (Basf, 1990);
- materiale di alleggerimento e carica isolante per cementi (utilizzabili nel recupero di vecchie costruzioni), intonaci ed elementi prefabbricati (mattoni, blocchi, ecc.) (AA.VV, 1994[1], p. 39);
- substrato per piste da atletica o manti stradali (Fabiani, 1994);
- materiale da isolamento, come blocchi o lastre stampate (APME, 1994), o come granulato iniettato nelle cavità murarie (Santos, 1994, p. 517).

3.4.8 Barriere foniche

Il campo dei manufatti utilizzati come barriere foniche lungo strade e autostrade rappresenta una appettibile soluzione per il riciclo di materie plastiche eterogenee, in virtù degli elevati quantitativi che possono essere garantiti da questa applicazione, delle limitate prestazioni meccaniche ed estetiche richieste e della competitività economica che i materiali riciclati presentano rispetto al calcestruzzo e all'acciaio.
Uno studio, condotto presso la Facoltà di Architettura del Politecnico di Milano (Piardi, et alii, 1994, pp. 507-514), ha evidenziato la possibilità di realizzare strutture di protezione fonica con materie plastiche indifferenziate, in sostituzione di quelle costruite con elementi in cemento integrati da vegetazione (questo tipo di soluzione è preferita, per il minor impatto ambientale, ai pannelli insonorizzanti).
In effetti, così facendo non si influenzano i valori di assorbimento dei suoni, in quanto questa funzione è totalmente demandata al terreno e alla vegetazione, mentre quella del cemento è solamente di contenimento; di fatto la plastica riciclata fornisce manufatti più leggeri e maneggevoli rispetto a quelli cementizi.
La struttura è costituita da un modulo di sezione trasversale trapezoidale (Fig. 74) (48), con dimensioni di base 120 cm x 200 cm e altezza variabile tra i 50 cm e i 300 cm: gli elementi che la compongono (Fig. 75) sono lastre estruse che si incastrano tra loro (Fig. 76), senza fissaggi meccanici, per mezzo di intagli fresati, la

cui stabilità è garantita dal peso del terreno: l'assemblaggio, che non richiede movimentazione meccanica, avviene per strati e garantisce, per l'assenza, rispetto alle strutture in cemento, di divisioni interne nel terreno, un corretto funzionamento biologico della parete.
Una applicazione, concettualmente simile alla precedente, realizzata in Germania è rappresentata dal sistema Multi-Brick (Hasemann, Weltring, 1995, p. 28): anche in questo caso, si tratta di elementi estrusi in plastica eterogenea, con una forma simile alla lamiera grecata (Fig. 77), che vengono sovrapposti uno all'altro, con interposto terreno di coltura, per formare delle barriere foniche ricoperte di vegetazione (dimensione alla base 110 cm e altezza 300 cm) (Fig. 78), utilizzabili nella protezione di centri abitati.

3.4.9 Applicazioni varie di polivinilcloruro (PVC) riciclato

Il polivinilcloruro (PVC) è il principale polimero vergine utilizzato nelle costruzioni e numerose sono, inoltre, le applicazioni di polimero riciclato. Tra queste si possono citare:

- tappeti e strati di rinforzo per pavimentazioni con materiale proveniente dal riciclo di cavi elettrici e telefonici (APME, 1992, p. 10) (Fig. 79 e Fig. 80) (49);
- lastre calandrate per pavimentazione industriale con materiale proveniente da riciclo di pavimentazioni dismesse (APME, 1992, p. 11) (Fig. 81) (50);
- raccordi e tubazioni di vario diametro e spessore, da materiale proveniente dalla raccolta differenziata di RSU e da tubazioni dismesse (PVC Information Council, 1996) (51).

3.4.10 Altre applicazioni

A conclusione di questo capitolo vengono riportate alcune applicazioni, relative all'impiego di materie plastiche riciclate nel settore delle costruzioni, citate in letteratura, delle quali, però, non vengono descritte modalità di lavorazione e prestazioni in opera. Tra queste vi sono:

- bitume per manti stradali realizzato con plastiche eterogenee, eccetto il polivinilcloruro (PVC), in Finlandia e Svezia (Heino, 1994, p. 569);

- fibre isolanti (tipo lana di vetro) da plastica riciclata (AA.VV, 1990, p. 9);
- pannelli per mobili e pavimenti per palestre da poliuretani espansi termoindurenti (PUR) riciclati (Kurtz, 1993, p. 70);
- manufatti in plastica eterogenea riciclata tra cui pavimentazioni temporanee per la movimentazione di veicoli pesanti nei cantieri, intelaiature per il contenimento di scarpate; armature temporanee per gallerie; barriere anti-urto (Zeon Kasei, 1996);
- piste da corsa e pavimentazione di campi sportivi con poliuretani e polipropilene riciclati da scarpette da ginnastica Nike (AA.VV., 1995[6], p. 45);
- pannelli espansi piani di grandi dimensioni per pavimentazione di battelli e moli (AA.VV., 1995[7], pp. 3-4).

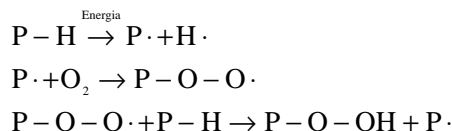
Note di approfondimento

1. In riferimento al *riciclo delle materie plastiche*, i rifiuti plastici nella sola Europa Occidentale, secondo dati del 1993 (APME, 1995[4]), a fronte di un consumo totale pari a circa 25 milioni di tonnellate, ammontano a circa 16 milioni di tonnellate, pari allo 0,6 % sul totale dei rifiuti prodotti e al 7,9 % sul totale dei rifiuti domestici prodotti. Di tutti questi rifiuti plastici il 67 % proviene dagli RSU, il 4 % dall'agricoltura, il 5 % dal settore automobilistico, il 5 % dal settore edilizio, il 16 % dalla distribuzione e il 3 % dal settore elettrico ed elettronico. Dal punto di vista della composizione per famiglie di polimeri, i rifiuti sono composti per il 65 % da poliolefine (polietilene 59 %, polipropilene 6 %), per il 10 % da polivinilcloruro, per 13 % da polistirene espanso e non, per il 6 % da polietilentereftalato e per il rimanente 6 % da altri polimeri.
Per quanto riguarda, invece, le materie plastiche effettivamente riciclate, l'origine e la composizione dei materiali riciclati sono fortemente influenzate, per motivi economici, dalla necessità di processare rifiuti omogenei. Questo fa si che la provenienza dei materiali riciclati sia solo in minima parte dai rifiuti e, invece, sia in larga parte da scarti di produzione: secondo dati del censimento Assorimap (Pinetti, 1994[2]), l'origine dei polimeri riciclati è per il 33 % da scarti di materie prime, per il 47% da scarti di trasformazione, per il 19 % da rifiuti da imballaggio (industriali, agricoli e commerciali) e solo per l'1 % da RSU. Quindi la composizione per famiglie dei polimeri riciclati risulta essere per il 66 % poliolefine (polietilene 42 %, polipropilene 24 %), per il 15 % polivinilcloruro, per il 5 % polistirene, per l'1 % polietilentereftalato e per il 13 % da altri polimeri (poliammidi 5 %, ABS 3 %, policarbonato 1 %, altri 4 %). Secondo una stima condotta sulla base dei consumi previsti di termoplastici di massa (che costituiscono circa l'80 % del totale consumato) e degli obiettivi di riciclaggio imposti dalle direttive CEE (AA.VV., 1995[13]), è possibile quantificare in 4 milioni di tonnellate i materiali riciclati, considerando la sola Europa occidentale. Nel 1993, in Italia, secondo dati del censimento Assorimap (Pinetti, 1994[2]), sono state effettivamente lavorate circa 800.000 tonnellate di materie plastiche di riciclo, con il 40 % del totale di provenienza straniera.
2. Circa il termine *riciclo* confronta nota 3 nel paragrafo "Obiettivi", e nota 8 nel Capitolo 1.
3. Gli aggettivi *meccanico, chimico, energetico* sono stati adottati, sulla base di un uso diffuso, dall'Associazione Europea dei Produttori di Materie Plastiche - APME - allo scopo di definire una terminologia comune relativamente al trattamento dei rifiuti (APME, 1993).
4. Il termine *riciclo chimico* è, secondo alcuni autori, suddivisibile nelle categorie "riciclo chimico" e "riciclo termochimico": nella prima rientrano i processi di idrolisi, alcolisi e glicolisi; nella seconda rientrano i processi di pirolisi, idrogenazione e gassificazione. La differenza, da un punto di vista dei materiali, tra le due categorie sta nel fatto che, con i processi appartenenti alla seconda, possono essere trttati rifiuti plastici di vario genere, senza ricorrere a dispendiose operazioni di preselezione dei materiali (Cattaneo, 1995; La Cirignola, 1996).
5. Confronta nota 3, Capitolo 2.
6. A riguardo dei processi di *glicolisi e metanolisi*, diversi produttori di polietilentereftalato (PET), Hoechst, Du Pont, Eastman Kodak, stanno cercando di applicare questi processi nel riciclo di bottiglie in PET, con risultati molto soddisfacenti (APME, 1993).
7. In relazione al *riciclo energetico* bisogna sottolineare come, secondo dati del 1993, in tutta l'Europa oltre 27 milioni di tonnellate di rifiuti vengano bruciate per produrre energia per riscaldamento e illuminazione: paesi particolarmente impegnati in questo campo sono la Svezia, la Danimarca e la Svizzera, con punte dell'80/90 % dei rifiuti inceneriti. Sul totale in peso dei rifiuti inceneriti, la plastica rappresenta solo il 7 %, ma contribuisce con il 50 % dell'energia generata (APME, 1993).
8. Circa l'utilizzo di *Refuse Derivated Fuel* è ormai prassi consolidata nei cementifici di Ravenna - Enichem: L'utilizzo di materiali plastici come combustibile nelle fornaci da cemento permette il risparmio del 5-8 % di combustibile tradizionale e consente, date le elevate temperature di esercizio (1300 °C) di evitare la formazione di sottoprodotti tossici che si formano a temperature inferiori e che normalmente richiedono filtri di abbattimento. Nel caso di combustione del PVC, inoltre, gli effluvi di acido cloridrico (HCl) vengono eleminati per reazione con il calcare utilizzato nelle fornaci per produrre il clinker (Cattaneo, 1995).
9. Con riferimento alle *variabili operative*, Francesco Paolo La Mantia (1995[4]) evidenzia, tra i principali parametri da tenere in considerazione per un effettivo controllo dei processi degradativi durante la lavorazione di un polimero, i seguenti fattori: il tempo e la temperatura di lavorazione al di sopra dello sforzo critico necessario per innescare la reazione di degradazione; il peso molecolare iniziale, in quanto determina la viscosità del fuso polimerico e, quindi, lo sforzo meccanico a cui esso viene sottoposto; la struttura del polimero, cioè il tipo di legame presente

o la sua ramificazione; i caratteri costruttivi delle apparecchiature impiegate, in quanto determinano diversi sforzi di taglio agenti sul materiale.
10. In merito alla *diminuzione della viscosità* al decrescere del peso molecolare del polimero, va sottolineato come essa influenzi positivamente la lavorabilità per laminazione o estrusione e come con essa diminuisca la degradazione legata agli sforzi meccanici durante le operazioni di trasformazione del materiale (La Mantia, 1995[4]; 1995[6], p. 4).
11. La formazione di *composti ossigenati* avviene, schematicamente, secondo questo tipo di reazione:

$$P - H \xrightarrow{\text{Energia}} P \cdot + H \cdot$$

$$P \cdot + O_2 \rightarrow P - O - O \cdot$$

$$P - O - O \cdot + P - H \rightarrow P - O - OH + P \cdot$$

dove:
$P\cdot$ è il radicale insaturo del polimero che catalizza la reazione a catena di degradazione.
12. In relazione agli *additivi stabilizzanti*, un esempio di come il riciclo imponga una riformulazione degli additivi appositamente studiata è dato dalla Ciba - Geigy, la quale pur avendo tra i propri prodotti numerosi validi stabilizzanti, normalmente usati con i materiali vergini (serie Irganox), ha messo a punto un sistema specifico, denominato Recyclostab, con alcuni additivi per la protezione dei polimeri riciclati alle alte temperature di processo (serie Recyclostab 400) e per la loro protezione alla luce (serie Recyclostab 800) (Ciba - Geigy, 1994).
13. Con riferimento alle *miscele omopolimeriche*, occorre sottolineare che l'incompatibilità non è generalizzabile a tutti i polimeri; per esempio, tra i polimeri che abitualmente si trattano nelle operazioni di riciclo, il polipropilene (PP) presenta incompatibilità tra materiale vergine e riciclato, mentre il polietilene (PE) ne è esente (La Mantia, 1995[7]).
14. Il termine *matrice* identifica il polimero la cui fase è presente in quantità maggiore nella miscela. In particolare, nel caso di miscele eterogenee riciclate, questa fase è costituita da poliolefine, che costituiscono circa il 65 % dei residui plastici raccolti, con prevalenza di polietilene (PE).
15. La *compatibilità tra poliolefine* rappresenta un problema di non poco conto in quanto anche gli attuali processi di separazione impiegati nella lavorazione di materia plastiche riciclate, basandosi esclusivamente su differenze di densità, non permettono di ottenere frazioni omogenee, con la separazione di polietilene (PE) da polipropilene (PP).
16.Gli *addittivi compatibilizzanti* normalmente in commercio sono, nella maggior parte dei casi, polimeri sui quali viene innestato perpendicolarmente alla catena un altro monomero, nel caso degli additivi ad azione fisica (per esempio stirene su polietilene a bassa densità), oppure un gruppo funzionale come anidride maleica (serie Fusabond - Dupont) o acido acrilico (serie Polybond - BP Chemicals), nel caso di additivi ad azione chimica. Un caso particolare di compatibilizzante è il polietileneclorurato (CPE) che viene utilizzato per compatibilizzare miscele di polietilene e polivinilcloruro (PE/PVC) (La Mantia, 1996). Una tecnica sfruttata nel caso vengano trattati polimeri riciclati, è quella che prevede la formazione *in situ*, cioè durante la lavorazione della miscela polimerica, del compatibilizzante: con questa tecnica si creano dei copolimeri, derivanti dalla reazione tra i prodotti di degradazione termomeccanica dei materiali trattati, miscibili in entrambe le fasi; esperienze di questo tipo sono state effettuate con miscele di LDPE/PVC (La Mantia, 1995[6], pp. 48-51) e di PET/PC (Pilati, 1994, p. 17).
17. Nella *raccolta dei rifiuti solidi urbani* (RSU) un caso tipico di incompatibilità da affrontare è quello tra le bottiglie per bevande gassate in polietilentereftalato (PET) e le chiusure in polietilene ad alta densità (HDPE).
18. Circa gli *additivi* che permettono di migliorare le proprietà meccaniche dei polimeri riciclati, oltre agli additivi stabilizzanti e antiossidanti (che agiscono sulle proprietà indirettamente, diminuendo i processi degradativi) e agli additivi compatibilizzanti (che migliorano le proprietà attraverso una maggiore sinergia tra i componenti), vi sono additivi che agiscono direttamente su alcune proprietà: le cariche minerali, o agenti rinforzanti, quali il carbonato di calcio, la wollastonite e le fibre di vetro, che agiscono, in particolare, sul modulo elastico del materiale, e gli agenti antiurto, generalmente gomme, il cui compito è quello di incrementare la resistenza all'urto (La Mantia, 1996).
19. Riguardo alla *diminuzione dell'allungamento a rottura*, alcune ricerche (La Mantia, 1995[6]) hanno dimostrato che, nel caso di polietilene a bassa densità (LDPE) utilizzato per teloni agricoli, i valori di allungamento a rottura aumentano nel materiale riciclato rispetto a quello da riciclare: tale fenomeno è da correlare alla presenza di difetti superficiali nel materiale da

riciclare, difetti indotti dalla degradazione per azione delle radiazioni solari che, attraverso la riomogeneizzazione del materiale durante le operazioni di riciclo, vengono eliminati, ripristinando le condizioni superficiali del materiale vergine.
20. In riferimento alla *degradazione del polivinilcloruro (PVC)* per azione del calore, si tratta di un processo molto più spinto rispetto agli altri polimeri poliolefinici. Il principale prodotto di tale processo è l'acido cloridrico (HCl), mentre nella macromolecola del polimero si formano insaturazioni che generano composti coniugati (benzene) e radicali interni che generano reticolazioni. La velocità di degradazione dipende dalla forma e dallo spessore del campione: questo aspetto, insieme alla notevole labilità termica del polivinilcloruro (PVC) rispetto ad altri polimeri simili, è spiegabile con l'azione catalizzatrice (quindi acceleratrice) dell'acido cloridrico sulla reazione di deidroclorurazione e, quindi, sulla degradazione del polimero (nei campioni di grosso spessore l'uscita dell'acido cloridrico è ritardata per la geometria e, di conseguenza, ne è limitata anche l'azione catalizzatrice) (La Mantia, 1995[6], pp. 31-35).
21. Nella *lavorazione del polivinilcloruro (PVC)*, per contrastare l'eccessiva sensibilità alle degradazioni termomeccaniche, si devono mantenere basse temperature e tempi brevi di esercizio, e si deve ricorrere all'aggiunta di massicce dosi di additivi stabilizzanti (in particolare sali di piombo) che assorbono l'acido cloridrico evitandone l'azione catalizzatrice. La presenza di questi stabilizzanti protegge, anche se parzialmente, la rilavorazione di oggetti in polivinilcloruro (PVC), tanto che è possibile sottoporli a ripetute lavorazioni senza un eccessivo deterioramento (La Mantia, 1995[6], p. 39).
22. Circa gli *impieghi del polivinilcloruro (PVC) nel settore elettrico*, costituisce il 50 % di tutti i polimeri usati per isolamento e rivestimento di cavi ad alta e bassa tensione, cavi per telecomunicazioni e cavi per circuiti elettrici di autoveicoli. Esistono già tecnologie per separare i conduttori dal rivestimento, con recupero del rame e di miscele di PVC e altri polimeri, miscele che vengono riutilizzate direttamente nelle mescole per cavi, oppure per tappeti per auto, filamenti per spazzole o come sottostrato per moquettes (EVC, 1991, p. 19).
23. L'aumento del *modulo elastico nel polietilentereftalato (PET) riciclato* è un fenomeno non ancora spiegato, forse legato alla maggiore velocità di cristallizzazione dei composti a minor peso molecolare rispetto alle catene del polimero vergine (La Mantia, 1995[6], p. 63).
24. In relazione alla *trasformazione del polietilentereftalato (PET)*, una delle più frequenti tecnologie utilizzate è quella della soffiatura ("Blow Moulding") con la quale si ottengono le bottiglie per bevande gassate, applicazione dove il PET è un polimero insostituibile per la sua impermeabilità all'anidride carbonica (CO_2). La degradazione del polimero diminuisce la sua viscosità e di conseguenza lo rende inadatto per la soffiatura, ma pur sempre utilizzabile nello stampaggio a iniezione e nell'estrusione.
25. In merito alle *disposizioni legislative per il riciclo di materiali termoindurenti*, esistono provvedimenti in materia in Francia e in Germania. In particolare, in seguito alle disposizioni del Ministero dell'Ambiente tedesco, nel 1990 in Germania è sorto un ente tra produttori di manufatti compositi denominato Ercom Composite Recycling GmbH, il quale opera attivamente nel riciclo di questi manufatti con il proprio impianto di Rastatt, dove vengono processati gli scarti raccolti presso le singole industrie con un impianto mobile di pre-frantumazione, appositamente studiato, capace di ridurre i materiali a dimensioni di 50 x 50 mm, dimensioni necessarie per poterli poi successivamente trasformare in polveri e fibre di rinforzo (Liebold, 1994).
26. Circa *l'assortimento di prodotti contenenti in percentuale materiale riciclato* possiamo citare: per la Bayer le marche Bayblend (policarbonato con acrilonitrile/butadiene/stirene - PC+ABS), Makrolon (policarbonato - PC), Novodur (acrilonitrile/butadiene/stirene - ABS), Durethan (poliammide - PA) e Pocan (polibutilentereftalato - PBT), per la Basf Luran (stirolo/acrilonitrile - ASA) e Terluran (acrilonitrile /butadiene/stirene - ABS), per la GE Plastics Remex (policarbonato, acrilonitrile/butadiene/stirene e polibutilentereftalato - PC, PBT e ABS e loro miscele).
27. Tra i *tecnopolimeri utilizzati nel settore automobilistico* figura il polimetilmetacrilato (PMMA), utilizzato per parti trasparenti di fanaleria e strumentazione (Di Diego, 1995): anche se non ancora riciclato industrialmente, alcune ricerche effettuate dimostrano come la stabilità termica, l'assenza di additivazioni, la compatibilità con policarbonato (PC) e acrilonitrile/butadiene/stirene (ABS) e la resistenza all'invecchiamento di questo materiale ne rendono competitivo il riciclo.
28. Circa *l'utilizzo di blend riciclati nel settore elettrotecnico*, le ditte che attualmente sono impegnate in questo campo sono IBM, Hewlett-Packard, Rank Xerox e Siemens Nixford (Bayer, 1995[1]).
29. Riguardo al *contenuto di poliolefine* nelle miscele eterogenee, è necessario che questo sia studiato in modo da bilanciare la migliore fluidità della miscela durante la lavorazione,

caratteristica che è garantita dai polietileni, e un livello accettabile di proprietà meccaniche, che, per contro, peggiorano all'aumentare di questo contenuto (Marino, 1995).
30. La *lavorabilità* delle miscele eterogenee è influenzata da: la presenza di resine termoindurenti (che non sono per natura riprocessabili e fusibili), la presenza di polivinilcloruro (PVC) (che si degrada alle normali temperature di lavorazione dei polimeri poliolefinici), le differenti temperature di rammollimento delle plastiche in esse contenute (in particolare il polietilentereftalato - PET - fonde a 270° C, mentre le miscele si lavorano circa a 210° C) e l'incompatibilità tra i polimeri poliolefinici e quelli stirolici (che genera scarsa adesione tra le diverse fasi) (Marino, 1995, p. 9).
31. In riferimento alla *compatibilizzazione delle miscele eterogenee*, diverse sono le ricerche effettuate negli ultimi anni. Tra queste in particolare si possono citare la compatibilizzazione di miscele di polistirolo (PS), polietilene a bassa densità (LDPE) e polivinilcloruro (PVC), con polietilene clorurato (CPE) (in percentuale del 10 %), polimero che presenta legami carbonio-cloro miscibili con la fase PVC, mentre il resto della catena è miscibile con la fase polietilenica (questo tipo di compatibilizzazione porta un notevole aumento dell'allungamento a rottura e della resilienza, con un piccolo calo del modulo e della tensione a rottura) (La Mantia, 1995[6]), oppure la compatibilizzazione di miscele di polietilene (PE) e polietilentereftalato (PET) (migliorano le proprietà meccaniche ma non la resistenza termomeccanica) (Wenguang, La Mantia, 1994[1]), oppure, ancora, la compatibilizzazione di miscele a matrice poliolefinica con aggiunte di polistirene (PS), polivinilcloruro (PVC), polietilentereftalato (PET) e poliammide (PA) (sono state migliorate la resilienza e l'allungamento a rottura) (De Groote, Godard, 1994).
32. In riferimento al *consumo di materie plastiche nel settore delle costruzioni*, nella sola Europa Occidentale, secondo dati del 1993 (APME, 1995[4]), ammonta al 20 % del totale delle materie plastiche consumate, percentuale pari a 5 milioni di tonnellate annue. Di queste circa il 10 % proviene da materiali plastici riciclati. I rifiuti di materia plastica provenienti dalla costruzione e demolizione di edifici ammontano, invece, al 4.6 % del totale, percentuale pari a circa 800 mila tonnellate/anno.
33. *Stabilobloc* è anche il nome dell'azienda belga detentrice dell'omonimo marchio registrato. Il suo indirizzo è Rue Pierre Joseph Antoine 1, 4040 HERSTAL, Belgio.
34. Le *possibilità di utilizzo degli Stabilobloc* vanno dai sottofondi per strade, aeroporti, ferrovie, metropolitane, campi da gioco, alla protezione di canalizzazioni interrate, al drenaggio e copertura delle discariche, alla costruzione di dighe, di pareti drenanti e di strade d'accesso ai cantieri (Stabilobloc, 1996[1]).
35. Circa il *processo di produzione dei blocchi*, gli scarti plastici, dopo essere stati triturati in piccole pezzature, vengono compressi e perforati in presse appositamente concepite, la cui capacità di riciclo è di 12 mila tonnellate/anno, dove gli scarti di materia plastica passano da un volume di circa 10 m^3 a uno di 0.5 m^3 (l'alimentazione della pressa è regolata in funzione della densità che vuole ottenere nel blocco - da 0.2 a 0.6 g/cm^3). I blocchi così ottenuti sono facilmente manovrabili e, se necessario, possono essere tagliati (Stabilobloc, 1996[1]).
36. In riferimento al *comportamento in esercizio degli Stabilobloc*, sono in corso presso l'Università di Lione ricerche per mettere a punto un modello viscoelastico non lineare e ortotropo che permetta di spiegarne l'azione (Stabilobloc, 1996[1]).
37. *Timbron* è anche il nome dell'azienda inglese detentrice dell'omonimo marchio registrato. Il suo indirizzo è Roman Way, Coleshill, Birmingham B46 1HG.
38. In merito all'*effetto legno* con il quale vengono rifiniti i prolifi Timbron, si tratta di un caso significativo di come l'utilizzo delle materie plastiche in edilizia sia, per motivazioni di ordine culturale, vincolato al processo di mimèsi, attraverso il quale si cerca di veicolare nei gusti e nelle abitudini degli utenti finali l'impiego di un materiale non tradizionale.
39. Per quanto concerne *le fibre di polietilene ad alta densità riciclato (HDPE)*, ulteriori approfondimenti sono allo studio per valutare il loro comportamento alle reazioni alcaline del calcestruzzo ottenuto con cemento portland, la resistenza ai cicli di gelo-disgelo e agli agenti atmosferici (Flynn, 1994, p. 534).
40. Per quanto riguarda la *produzione di resina poliestere insatura* partendo da polietilentereftalato, il materiale di riciclo viene depolimerizzato per glicolisi per formare oligomeri a basso peso molecolare che, per reazione con acido dibasico insaturo o anidride, danno luogo al poliestere insaturo. Questa resina, che usualmente non può essere ottenuta partendo da acido tereftalico vergine, per ragioni di costo e difficoltà di lavorazione, presenta, rispetto a quelle normalmente prodotte, migliori proprietà meccaniche e una velocità di reazione doppia (Rebeiz, 1995, p. 10).

41. In riferimento al *calcestruzzo polimerico*, nel caso di aggiunte di resine poliesteri insature, si ottengono conglomerati molto resistenti, con tempi di maturazione velocissimi (da pochi minuti a un'ora) e di durabilità molto elevata (resistenza agli attacchi chimici, permeabilità e porosità bassa), utilizzati per le loro caratteristiche nella realizzazione di strati superficiali di pavimentazioni industriali (alta resistenza all'abrasione), di ponti (bassa permeabilità al cloro), di contenitori per rifiuti chimici e di opere idrauliche (Rebeiz, 1995, p. 12).
42. Riguardo al *riciclo di profili* in polivinilcloruro (PVC), esiste anche in Austria (EVC, 1991, p. 22) un sistema obbligatorio di ritiro di profili finestra usati da destinare al riciclo. La lavorazione di questi profili, operata da un consorzio di produttori, è, però, di tipo manuale, mentre l'impianto tedesco è totalmente automatizzato.
43. Circa *l'impianto di riciclo di serramenti* in polivinilcloruro (PVC) di proprietà della VEKA, il più grande produttore di serramenti in PVC in Europa, è significativo che sia sorto in Germania, in quanto questo paese rappresenta il mercato più vasto, nel continente, per questi manufatti. In Germania, infatti, i serramenti in PVC coprono il 44 % del mercato, con 7 milioni di unità installate l'anno, consumi che, comunque, sono molto elevati in tutti i paesi dell'Europa centrale (Austria 50 %, Belgio 40 %, Olanda 36 %, Francia 34 %, Regno Unito 34 %, Danimarca 33 %, Svizzera 24 %): per contro, nei paesi dell'Europa meridionale, i consumi di serramenti in PVC sono modesti (Italia 11%, Grecia 9 %, Spagna 8 %, Portogallo 2%), principalmente perché il PVC è molto sensibile agli sbalzi termici che caratterizzano il clima di queste nazioni. In Italia i consumi di serramenti sono per il 52 % in legno, per il 37 % in alluminio e per l'11 % in PVC (AA.VV, 1995[3]).
44. In riferimento all'utilizzo di gomma riciclata, questa viene impiegata dai maggiori produttori di pneumatici tra i quali Goodyear, Continental, Firestone, Pirelli e Vredestein (Vredestein, 1996).
45. Riguardo alla *miscelazione di gomma riciclata e calcestruzzo*, uno studio del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università del North Caroline a Raleigh (AA.VV, 1995[4], p. 3) ha evidenziato la fattibilità di miscele di calcestruzzo contenenti particelle di pneumatici frantumati (0.8 mm. di diametro) in misura del 10 %, senza che si abbiano diminuzioni sensibili delle prestazioni meccaniche e della durabilità del conglomerato.
46. Per quanto concerne le *coperture in materia plastica*, i pannelli per tetti in tecnopolimeri termoplastici sono già disponibili sul mercato americano da molti anni, mentre sono ancora sconosciuti nell'edilizia europea. La tegola "finto legno" è molto diffusa in America, mentre, in Europa, solo di recente la GE Plastics ha messo a punto le "finte tegole spagnole", installandole sulla "casa esposizione" ("Royal House") situata nell'area del LEEp ("Living Environment Europe Project") a Bergen op Zoom, in Olanda (GE Plastics, 1995[1]).
47. In riferimento al riciclo di polistirene espanso, la Basf, multinazionale tedesca, produce e commercializza una serie di polimeri (Styromull) ottenuti dalla macinazione di polistirene espanso riciclato (serie Styropor), proveniente da scarti di lavorazione e da imballaggi dismessi, in particelle di dimensioni variabili dai 4 mm ai 25 mm, secondo l'applicazione a cui vengono successivamente destinati (Basf, 1990).
48. Circa la *sezione trasversale trapezoidale* delle barriere foniche, è stata studiata per un corretto funzionamento biologico della struttura, in quanto garantisce alla vegetazione un soleggiamento e una idratazione uniforme su tutti i livelli della barriera (Piardi, et alii, 1994, p. 510).
49. Per quanto concerne il *riciclo di cavi e fili*, il polivinilcloruro (PVC) costituisce lo strato di rivestimento esterno: circa il 65 % delle 20000 tonnellate di cavi telefonici riciclati dalla SIP è costituita da materiale plastico, di cui 10000 tonnellate sono di PVC (il resto è polietilene - PE). Questo materiale riciclato viene utilizato per applicazioni secondarie in quanto è inquinato da gomme, che sono difficilmente separabili (APME, 1992, p. 10).
50. Il riciclo di *polivinilcloruro (PVC) per pavimentazioni* è frutto della cooperazione tra i produttori europei del polimero (Basf, Elf Atochem, EVC, Hoechst, Huls, Norsk Hydro, Solvay and Wacker) e produttori di pavimentazioni in PVC, che hanno dato vita alla Association for PVC Floor Cobering Recycling (AgPR). Il riciclo viene effettuato in un impianto sito in Germania e si stima che per riciclare le circa 30000 tonnellate di pavimentazioni in PVC dismesse all'anno in Germania occorrano 6-8 impianti di questo tipo (APME, 1992, p. 11).
51, Per quanto riguarda il *riciclo di tubazioni in polivinilcloruro (PVC)*, si possono citare i seguenti progetti: IPW (Interplastic - Werk) a Wels (Austria); Nordisk Wavin ad Hammel (Danimarca); Wavin a Twist (Germania); Dijka Steenwijk/Fks (Federatie van Kunststofleiding) in Olanda e Wavin KLS ad Hardenberg (Olanda) (APME, 1996, pp. 16-17).

Capitolo 4
LA PROGETTAZIONE DI MANUFATTI CON LE MATERIE PLASTICHE DI RICICLO

In questo capitolo si prendono in esame i principi guida per la progettazione di manufatti con le materie plastiche di riciclo, parametri che riguardano aspetti dimensionali, sollecitazioni, caratteristiche funzionali del prodotto (1). Occorre sottolineare che, nel quadro dei materiali provenienti da processi di riciclo, solo i polimeri termoplastici, per loro natura, si prestano a essere lavorati più volte: le proposte espresse in questo capitolo sono da intendersi rivolte a questa particolare classe di materie plastiche di riciclo, ricordando tuttavia che esse sono valide, in generale, anche per le materie plastiche vergini e, pertanto, anche per i polimeri termoindurenti. In linea di principio non esiste, infatti, alcuna differenza nella lavorazione di materie plastiche vergini e di riciclo, se trattate come materiali omogenei (cioè non miscelando diverse categorie di polimeri) e non contaminati: per questo motivo si evita, nel seguito, di specificare il termine "di riciclo", se non quando particolarmente necessario, rimanendo implicito che è a quel tipo di materiali che ci si riferisce. L'unica differenza sussiste nel momento in cui i polimeri sono rilavorati in modo eterogeneo (cioè miscelati tra loro): in questo caso esistono problematiche e parametri progettuali particolari, rispetto ai materiali vergini, che vengono opportunamente specificati.
Nella progettazione di componenti in plastica, essendo le resistenze meccaniche dei materiali inferiori a quelle dei metalli e del legno, si cerca di sfruttare una percentuale maggiore della resistenza disponibile: si può, infatti, pensare di ricorrere a un sovra-dimensionamento del manufatto, strategia che comporta uno spreco di risorse (materiali ed energia) e che, tra l'altro, non garantisce l'utente dai rischi di rottura. L'aumentata richiesta di affidabilità e l'esigenza di scelte "sostenibili" spingono, però, il progettista a un rigoroso e razionale approccio al problema della progettazione,

approccio che non riguarda solamente l'ottimizzazione delle prestazioni, ma deve rappresentare il corretto equilibrio tra aspetto visuale e aspetto esecutivo. In tal senso, oltre alla conoscenza del comportamento fisico-meccanico dei materiali polimerici (Cap. 2) e della varietà di materiali potenzialmente disponibili (Cap. 3), occorre saper governare le possibili forme e soluzioni costruttive che le tecnologie di trasformazione impongono, parametri che possono influenzare, in modo preponderante, prestazioni e qualità del manufatto.
La definizione dei parametri di progettazione passa, innanzitutto, attraverso un corretto dimensionamento e, quindi, la previsione delle condizioni di esercizio che incontrerà il prodotto (Par. 4.1). Occorre, in seguito, definire tutti quei parametri che, a prescindere dalla forma del manufatto, ne condizionano l'efficienza: nel caso dei manufatti stampati (Par. 4.2) si parla, in particolare, di spessori di parete (Par. 4.2.1), di nervature (Par. 4.2.2 e Par. 4.2.3), di inserti e attacchi (Par. 4.2.4 e Par. 4.2.5), di problemi relativi a tensionamenti eccessivi (Par 4.2.6), di angoli di sformatura (Par. 4.2.7) e, infine, di giunti che permettano la riciclabilità del componente come i giunti a incastro elastico (Par. 4.2.8) e i giunti a pressione (Par 4.2.9); nel caso, invece, dei profili estrusi (Par. 4.3) si parla, in particolare, di uniformità di parete (Par. 4.3.1), di alleggerimenti (Par. 4.3.2) e di raccordi (Par. 4.3.3). L'ambito specifico di questa tesi impone, inoltre, di considerare quelli che sono i parametri guida di un "design" orientato al riciclo (Par. 4.4).

4.1 L'analisi strutturale e le condizioni d'esercizio del manufatto

La progettazione strutturale, la geometria, i carichi, il legame costitutivo, l'influenza del tempo e della temperatura, le condizioni di applicazione del carico, le condizioni ambientali, il coefficiente di sicurezza, la sollecitazione ammissibile, i fattori di riduzione.

Il progetto di un manufatto ha inizio dall'analisi accurata delle proprietà, funzionali e prestazionali, che il prodotto finito deve garantire (2), analisi che deve permettere il dimensionamento di massima delle sezioni resistenti del componente. In generale, nella progettazione strutturale i fattori da considerare sono tre e precisamente:

- la geometria, cioè la forma e le dimensioni del componente;
- i carichi, cioè le sollecitazioni, e le conseguenti deformazioni, a cui si prevede sia sottoposto il materiale; queste sollecitazioni

possono essere date da forze e momenti esterni, oppure da deformazioni forzate (come nel caso dei giunti a pressione o a scatto) od ostacolate (per esempio dovute ai diversi coefficienti di dilatazione termica in materiali compositi; oppure dovute al ritiro impedito del materiale in conseguenza dell'impiego di inserti metallici in pezzi stampati a iniezione) (Hoechst, 1979[1], p. 6).
- i legami costitutivi, cioè le caratteristiche meccaniche (sforzi-deformazioni) del materiale usato.

Nel caso particolare delle materie plastiche, il cui comportamento è fortemente influenzato dal tempo e dalla temperatura d'esercizio, questi tre fattori vanno integrati con l'analisi dei seguenti elementi (GE Plastics, 1994, p. 4-5):
- la velocità di applicazione del carico;
- la durata di applicazione del carico, in quanto una deformazione iniziale trascurabile, derivante da un carico contenuto, può diventare inaccettabile dopo una sollecitazione prolungata;
- le forze d'urto, poichè una forte sollecitazione per un breve periodo è in grado di generare una rottura precoce;
- le vibrazioni, perché possono modificare l'entità della sollecitazione cui è sottoposto un componente;
- le condizioni ambientali previste, in particolare gli estremi termici d'esercizio e la prolungata esposizione all'aperto del componente, che possono degradare le proprietà del materiale.

Per l'analisi strutturale, una volta definiti tutti i fattori al contorno, anche per i materiali plastici, laddove geometria dell'oggetto e sollecitazioni applicate risultino particolarmente semplici, come nel caso di componenti per l'edilizia, è possibile rifarsi ai tradizionali metodi legati alla teoria dell'elasticità (in particolare le soluzioni relative alle travi e alle lastre sollecitate assialmente, a taglio e con momenti flettenti e torcenti) (3), tenuto conto, però, che il comportamento viscoelastico dei materiali polimerici impone l'uso di costanti elastiche (modulo di Young e coefficiente di Poisson) riferite al tempo e alla temperatura d'esercizio previsti.
Naturalmente le soluzioni progettuali devono possedere un grado sufficiente di sicurezza, anche in relazione al fatto che si tratta di materiali riciclati, quindi non controllati o controllabili al 100 %: nella progettazione di componenti in plastica è regola fondamentale che avvenga sempre il collaudo sul prodotto finito, in quanto esistono parametri, come per esempio le autotensioni conseguenti alle fasi di lavorazione, che possono indebolire in maniera non prevedibile il prodotto. Comunque, sono stati definiti dei fattori di sicurezza, desunti dall'esperienza pratica e dai risultati di analisi teoriche (Tab.

16), che tengono conto delle seguenti cause (Hoechst, 1979[1], p. 15):

- anisotropia delle proprietà meccaniche dovuta alla lavorazione (raffreddamento, cristallizzazione, orientamento) (Fig. 82);
- scostamento della sollecitazione nelle condizioni di prova rispetto a quelle reali.

Pertanto, in base a questi coefficienti di sicurezza, la tensione massima ammissibile, viene calcolata con l'equazione (4.1) (Rao, 1992, p. 80).

$$\sigma_{amm.} = \frac{K}{S \cdot A} \qquad (4.1)$$

dove:
$\sigma_{amm.}$ (N/mm^2) è la sollecitazione ammissibile;
K (N/mm^2) è la resistenza caratteristica del materiale;
S è il coefficiente di sicurezza;
A è il fattore di riduzione del materiale.

La sollecitazione ammissibile dipende, dunque, dal fattore di riduzione proprio del materiale che, a sua volta, è il prodotto di diverse componenti come illustrato dall'equazione (4.2) (Rao, 1992, p. 80).

$$A = A_{\theta} \cdot A_{st} \cdot A_{dyn} \cdot A_{A} \cdot A_{w} \cdot \alpha_{K} \qquad (4.2)$$

dove:
A_{θ} è il fattore di riduzione per l'effetto della temperatura sulla resistenza a trazione; con 0 £ q £ 100 °C vale:

$$A_{\theta} = \frac{1}{1-[k(\theta-20)]} \qquad (4.3)$$

con k, riferito a 20° C, che, per esempio, per la poliammide 6 (PA6) è uguale a 0.0125;
A_{st} è il fattore di riduzione per la durata del carico statico e vale:

1.3 (ore)
1.6 (settimane)
1.7 (mesi)
2 (anni);

A_{dyn} è il fattore di riduzione per l'effetto del carico dinamico e può variare da 1.3 a 1.6;

A_A è il fattore di riduzione per l'effetto dell'invecchiamento e deve essere calcolato sperimentalmente;
A_W è il fattore di riduzione per l'assorbimento di acqua da parte del materiale plastico e vale:

$$A_w = \frac{1}{1-0.22f} \qquad (4.4)$$

con f che rappresenta il contenuto percentuale di umidità nel materiale;
α_K è il fattore di riduzione per la concentrazione delle tensioni (Par. 4.2.6).

Tab. 16 Coefficienti di sicurezza S consigliati
Si evidenziano i coefficienti di sicurezza consigliati per la progettazione di elementi strutturali sottoposti a sollecitazione statica, intermittente, alternativa (Hoechst, 1979[1]).

	Sollecitazione statica	**Sollecitazione intermittente**	**Sollecitazione alternativa**
Rottura	2...3	3...4	1,5...2
Deformazione eccessiva	1...2	1...2	1...2
Instabilità	3	3	3

4.2 La progettazione di forme stampate

Il design industriale, le norme VDI - Lo spessore di parete nominale, le variazioni di spessore, i raccordi - Le nervature, le dimensioni, la sezione - Le nervature bidirezionali, il diagramma triassiale, gli esempi di calcolo - Le nervature unidirezionali, la rigidità equivalente, il diagramma flessione, il diagramma resistenza, gli esempi di calcolo - Le nervature di supporto, le dimensioni - Le borchie, le dimensioni - Le cavità e i fori, le distanze minime, la profondità - Gli intagli e le concentrazioni delle tensioni, il fattore di concentrazione, gli effetti e i problemi - L'angolo di sformatura - I giunti a incastro elastico, la deformazione indotta, la freccia massima, le equazioni di calcolo, la trave semplice, la trave rastremata, il giunto cilindrico, il giunto sferico - I giunti a pressione, i principi, l'interferenza dimensionale, la pressione di accoppiamento.

La tecnologia dello stampaggio (4), è, al contrario della tecnologia dell'estrusione, una lavorazione discontinua, che permette però di produrre componenti con la massima libertà di forma, anche molto complessa, in una sola operazione: la lavorazione dei materiali polimerici per stampaggio permette una produzione razionale di parti con una tolleranza nel peso minore di 1 g, con manufatti che possono arrivare sino a un peso maggiore di 100 kg e parti termoformate sino a 16 m^2 di superficie, come pure corpi cavi sino a 20000 litri di capacità (Saechtling, 1993, p. 15).
Per la riuscita ottimale di un manufatto stampato è necessario rispettare una serie di vincoli relativi a due fasi della progettazione: la prima, inerente al disegno industriale del componente, riguarda alcuni principi progettuali che consentono, a prescindere dalla forma specifica del pezzo, di ottenere un manufatto efficiente dal punto di vista prestazionale, funzionale e visivo; la seconda è inerente la progettazione dello stampo, la previsione dei punti di iniezione della massa del polimero fuso all'interno dello stampo, della velocità del flusso e delle temperature d'esercizio, parametri che garantiscono l'affidabilità del manufatto in esercizio. Di seguito ci si occupa della prima delle due fasi, non essendo di competenza del progettista ma del tecnico industriale la seconda, e, in particolare, si discutono alcune variabili caratteristiche:

- lo spessore di parete;
- le nervature;
- le nervature di supporto;
- le borchie;
- le cavità di alleggerimento e i fori;
- gli intagli e la concentrazione delle tensioni;
- l'angolo di sformatura;
- i giunti a incastro elastico;

- i giunti a pressione.

Le prescrizioni e le raccomandazioni discusse derivano, in gran parte, dall'esperienza pratica e sono frutto della rielaborazione di quanto riportato nelle guide tecniche che le principali multinazionali produttrici di polimeri forniscono a supporto della loro clientela (cfr. nota 1): esistono, comunque, due norme, la VDI 2001, per i manufatti stampati di termoindurenti, e la VDI 2006, per i manufatti stampati termoplastici, norme elaborate dalla VDI (Verein Deutscher Ingenieure), che danno alcuni orientamenti sulla progettazione di manufatti in modo tale che, durante le fasi di stampaggio, non si vengano a creare tensioni interne, deformazioni o ritiri.

4.2.1 Lo spessore di parete

L'intelaiatura o struttura di base di un componente viene definita, in gergo tecnico, "parete nominale" (GE Plastics, 1994, pp. 44-45): su di essa vengono aggiunti tutti i dettagli che definiscono un manufatto complesso. Le caratteristiche o i difetti che possono interessare un manufatto stampato hanno quasi sempre attinenza con lo spessore di tale parete: appare evidente, dunque, quanto sia importante calcolarlo correttamente. Infatti, per uno spessore di parete nominale insufficiente si possono generare cedimenti strutturali o un isolamento inadeguato, mentre, d'altro canto, uno spessore di parete nominale troppo elevato, anche se circoscritto in zone ben localizzate, può essere causa di difetti estetici, oltre a rappresentare un inutile appesantimento del componente. Nel caso dei polimeri termoplastici, in linea generale, lo spessore di parete è generalmente compreso tra 0.5 mm e 4 mm (si stampano, comunque, spessori anche di 10-20 mm), fermo restando che questo va comunque calcolato sulla base delle sollecitazioni previste e delle caratteristiche del materiale prescelto. Nel caso di materiali eterogenei, a causa della presenza di impurezze e di un amalgama non perfetto, occorre, lavorare con spessori maggiori, partendo da un minimo di 5 mm (comunque, tutti i suggerimenti in seguito riportati rimangono validi, fatto salvo il salto di scala da considerare in proporzione). Il progettista dovrebbe, in linea di principio, mantenere costante lo spessore di parete nominale: infatti, lo spessore incide sulla velocità di raffreddamento dello stampato; quindi, spessori disuguali provocano velocità di raffreddamento diverse e, di conseguenza, creano stati di autotensione differenziati (Par. 4.2.6), segni di risucchio,

deformazioni, ritiro non uniforme (Tav. 1); inoltre, sono possibili problemi di scorrimento della massa fusa del polimero durante la lavorazione, con conseguenti distorsioni e difetti estetici.
In realtà, spesso accade che non si possano evitare variazioni di spessore (Fig. 83); in questo caso non devono superare il 25 % del totale, nel caso di materiali a basso ritiro allo stampaggio, e il 15 % del totale, nel caso dei materiali ad alto ritiro allo stampaggio. Inoltre, è opportuno prevedere lo scorrimento del fuso polimerico dal punto di maggiore a quello di minore spessore (si evitano così i segni di risucchio), badando di evitare spigoli vivi o variazioni repentine in quanto causano concentrazione delle tensioni e provocano, spesso, rotture precoci nel manufatto; un possibile accorgimento per ridurre gli inconvenienti relativi alle variazioni di spessore è il carotaggio delle parti più spesse (Dupont, 1990, p. 3.2) (Tav. 2).
Infine, una corretta definizione del punto di incontro tra due pareti d'angolo, che tenga presente possibili effetti tensionali, deve evitare di unire un raccordo interno con uno spigolo esterno (Dupont, 1990, p. 3.2) (Tav. 3).

4.2.2 Le nervature

Se in un manufatto è richiesta maggiore resistenza o maggiore rigidezza, è molto più economico, e meno problematico, ricorrere alle nervature piuttosto che a incrementi dello spessore di parete nominale (Beck, 1980, p. 106) (Tav. 4). Le nervature permettono, aumentando l'inerzia della sezione resistente, di migliorare notevolmente le prestazioni meccaniche del manufatto, anche se possono essere a loro volta causa di distorsioni e di problemi estetici.
Per progettare correttamente le nervature è necessario seguire i seguenti principi (GE Plastics, 1994, pp. 46-47):

- lo spessore alla base della nervatura non deve superare il 60 % dello spessore delle pareti adiacenti se inferiore a 3 mm e il 40 % se superiore a 3 mm (GE Plastics, 1989[1], p. 52), al fine di evitare sulle stesse i cosiddetti segni di risucchio ("sink mark"), causati dal maggior ritiro nell'intersezione tra parete e nervatura (Tav. 5 e Tav. 6);
- l'altezza delle nervature deve essere inferiore al triplo dello spessore delle pareti vicine, per ridurre la formazione di tensioni interne e per eventuali problemi di riempimento dello stampo e di

estrazione del pezzo finito; in questo senso, volendo aumentare la resistenza meccanica del manufatto è preferibile aumentare il numero delle nervature piuttosto che la loro altezza (Tav. 5);

- alla base delle nervature è necessario prevedere un raggio di raccordo pari al 25 % dello spessore di parete delle zone adiacenti, onde evitare fenomeni d'intaglio; raggi di raccordo elevati, per esempio superiori al 50 %, possono provocare segni di risucchio sulla superficie opposta alla nervatura (Tav. 5);
- la distanza minima tra le nervature deve essere pari al doppio dello spessore di parete nominale (Tav. 5);
- l'angolo di sformatura deve essere pari ad almeno 0.5° su ciascun lato della nervatura (Tav. 5).

Per facilitare il calcolo di sezioni nervate sono stati messi a punto alcuni metodi semplificati che permettono di determinare le dimensioni delle nervature necessarie a garantire una specifica rigidezza del manufatto: questi metodi si riferiscono alle nervature bidirezionali (Par. 4.2.2.1) e alle nervature unidirezionali (Par. 4.2.2.2).

4.2.2.1 Le nervature bidirezionali

Nel caso delle nervature bidirezionali (Dupont, 1990, pp. 4.22-4.24) è possibile calcolare sezioni nervate partendo da diversi fattori, quali la riduzione in percentuale di materiale, il minimo spessore della parete nominale, l'altezza totale della piastra nervata e il numero delle nervature. Il diagramma triassiale elaborato in figura 84 descrive la relazione dimensionale tra una piastra piana e una piastra a nervature incrociate aventi il medesimo momento d'inerzia (Tav. 7).

In questo diagramma sull'asse delle ascisse è riportato il rapporto (t_A × N) / W dove:

t_A (mm) è lo spessore della parete nominale della piastra non nervata;

N è il numero di nervature per millimetro;

W (mm) è la larghezza della piastra; questo valore è assunto uguale a 1.

Sull'asse sinistro delle ordinate è riportato il rapporto t_A / t_B dove:

t_B (mm) è lo spessore della parete nominale della piastra nervata.

t_A (mm) è lo spessore della parete nominale della piastra non nervata.

Occorre sottolineare che, per semplicità, la parete della nervatura e la parete nominale sono state assunte di uguale spessore; è comunque possibile modificare lo spessore delle nervature agendo sul valore della spaziatura tra una nervatura e l'altra.
Sull'asse destro delle ordinate è riportato il rapporto T / t_A dove:
T (mm) è lo spessore totale della piastra nervata.
t_A (mm) è lo spessore della parete nominale della piastra non nervata;
Lungo la curva, infine, sono riportati vari rapporti di volume V_B / V_A dove:
V_B (mm^3) è il volume della piastra nervata;
V_A (mm^3) è il volume della piastra piana.
Per ogni combinazione tra le variabili T, t_B, N, questi rapporti di volume specificano il minimo volume di materiale necessario per ottenere una struttura equivalente a quella non nervata.
Di seguito, sono riportati alcuni esempi di calcolo dove i parametri considerati vengono modificati in funzione di esigenze di geometria o di lavorazione del manufatto.

Esempio di calcolo 1 (Dupont, 1990, p. 4.23)

Se non esistono particolari restrizioni relativamente alla geometria del pezzo, la curva può essere utilizzata per stabilire le dimensioni che garantiscono una riduzione di materiale prestabilita.

Dati: spessore parete nominale della piastra piana t_A = 1.7 mm

Richiesta: riduzione di materiale pari al 40%, quindi $\frac{V_B}{V_A}$ = 0.60

Dal diagramma (Fig. 84) si ottiene per il rapporto di volume richiesto:

$$\frac{t_A \cdot N}{W} = 0.135$$

$$N = \frac{0.135 \times 1}{1.7} = 0.079$$ nervature per mm (8 nervature ogni 100 mm)

$$\frac{t_B}{t_A} = 0.44$$

t_B = 0.44 x t_A = 0.44 x 1.7 = 0.75 mm

$$\frac{T}{t_A} = 1.875$$

T = 1.875 x t_A = 1.875 x 1.7 = circa 3.2 mm

Altezza nervatura T - t_B = 3.2 - 0.75 = 2.45 mm

Quindi, per ottenere una piastra nervata di rigidità equivalente a una piastra piana di larghezza unitaria e spessore 1.7 mm, partendo da una riduzione di materiale pari al 40 %, occorre progettare una piastra di spessore di parete nominale 0.75 mm, irrigidita con 8 nervature ogni 100 mm, di egual spessore e di altezza pari a 2.45 mm.

Esempio di calcolo 2 (Dupont, 1990, p. 4.23)

Se esistono particolari restrizioni relativamente al fuso polimerico, la curva può essere utilizzata per stabilire le dimensioni che garantiscono uno spessore minimo della piastra nervata.

Dati: spessore parete nominale della piastra piana $t_A = 1.25$ mm
Richiesta: spessore parete nominale della piastra nervata $t_B = 0.5$ mm, quindi $\frac{t_B}{t_A} = \frac{0.5}{1.25} = 0.4$
Dal diagramma (Fig. 84) si ottiene per lo spessore della parete richiesto:

$$\frac{T}{t_A} = 1.95$$

$T = 1.95 \times t_A = 1.95 \times 1.25 = 2.5$ mm

$$\frac{t_A \cdot N}{W} = 0.125$$

$N = \frac{0.125 \times 1}{1.25} = 0.1$ nervature per mm (1 nervatura ogni 10 mm)

$$\frac{V_B}{V_A} = 0.55$$

Altezza nervatura $T - t_B = 2.5 - 0.5 = 2$ mm

Quindi, per ottenere una piastra nervata di rigidità equivalente a una piastra piana di larghezza unitaria e spessore 1.25 mm, partendo da uno spessore della parete nominale pari a 0.5 mm, occorre progettare una piastra di spessore totale 2.5 mm, irrigidita con 1 nervatura ogni 10 mm, di egual spessore e di altezza pari a 2 mm, ottenendo un risparmio del 45 % di materiale.

Esempio di calcolo 3 (Dupont, 1990, p. 4.23)

Se esistono particolari indicazioni relativamente alla forma del manufatto, la curva può essere utilizzata per stabilire le dimensioni che corrispondono a uno spessore totale massimo della piastra nervata.

Dati: spessore parete nominale della piastra piana t_A = 6.5 mm

Richiesta: spessore totale della piastra nervata T = 10.8 mm,

quindi $\frac{T}{t_A} = \frac{10.8}{6.5}$ = 1.66

Dal diagramma (Fig. 84) si ottiene per lo spessore totale richiesto:

$\frac{t_A \cdot N}{W}$ = 0.175

N = $\frac{0.175 \times 1}{6.5}$ = 0.027 nervature per mm (1 nervatura ogni 37 mm)

$\frac{t_B}{t_A}$ = 0.56

t_B = 0.56 x t_A = 0.56 x 6.5 = 3.65 mm

$\frac{V_B}{V_A}$ = 0.76

Altezza nervatura T - t_B = 10.8 - 3.65 = 7.15 mm

Quindi, per ottenere una piastra nervata di rigidità equivalente a una piastra piana di larghezza unitaria e spessore 6.5 mm, partendo da uno spessore totale pari a 10.8 mm, occorre progettare una piastra con spessore della parete nominale pari a 3.65 mm, irrigidita con 1 nervatura ogni 37 mm, di egual spessore e di altezza pari a 7.15 mm, ottenendo un risparmio del 24 % di materiale.

Esempio di calcolo 4 (Dupont, 1990, p. 4.24)

Se esistono particolari restrizioni relativamente al numero delle nervature, a causa di possibili interferenze con componenti interni del manufatto, la curva può essere utilizzata per stabilire le dimensioni che garantiscano un numero massimo di nervature.

Dati: spessore parete nominale della piastra piana (t_A) = 2.2 mm

Richiesta: N = 0.08 nervature per mm (8 nervature ogni 100 mm),

quindi $\frac{t_A \cdot N}{W} = \frac{2.2 \times 0.08}{1} = 0.176$

Dal diagramma (Fig. 84) si ottiene:

$\frac{t_B}{t_A} = 0.56$

$t_B = 0.56 \times t_A = 0.56 \times 2.2 =$ circa 1.25 mm

$\frac{T}{t_A} = 1.66$

$T = 1.66 \times t_A = 1.66 \times 2.2 =$ circa 3.65 mm

$\frac{V_B}{V_A} = 0.76$

Altezza nervatura $T - t_B = 3.65 - 1.25 = 2.4$ mm

Quindi, per ottenere una piastra nervata di rigidità equivalente a una piastra piana di larghezza unitaria e spessore 1.7 mm, partendo da un numero massimo di nervature pari a 8 ogni 100 mm, occorre progettare una piastra di spessore di parete nominale 2.2 mm, e spessore totale pari a 3.65 mm, ottenendo una riduzione di materiale del 24 %.

4.2.2.2 Le nervature unidirezionali

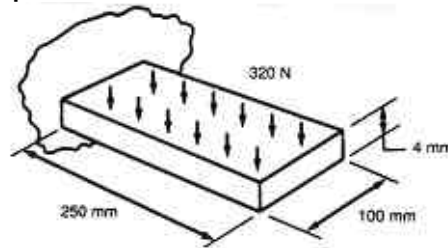
Nel caso delle nervature unidirezionali (Dupont, 1990, pp. 4.24-4.27) è possibile mettere a confronto una piastra piana con una piastra nervata in una sola direzione, di rigidezza equivalente (le nervature hanno efficacia massima quando sono disposte nella direzione secondo cui agisce la flessione): entrambe le piastre sono suddivise in piccole porzioni per ognuna delle quali viene calcolato il momento d'inerzia (Fig. 85). Ogni momento d'inerzia della porzione di piastra piana viene confrontato con quello dell'equivalente porzione di piastra nervata: la somma delle inerzie delle singole porzioni equivale al momento d'inerzia della piastra intera. Sulla base della variazione del momento d'inerzia della sezione nervata, al variare dello spessore della parete nominale, dell'altezza e del numero delle nervature, sono state definite con particolari programmi di calcolo delle curve che permettono di calcolare sezioni nervate equivalenti a sezioni piane, sia in termini di deformazioni flessionali che in termini di sollecitazioni ammissibili, considerando uno spessore della nervatura pari al 60 % dello spessore della parete nominale. Nel diagramma relativo al comportamento a deformazione (Fig. 86), sull'asse delle ascisse è riportato il rapporto H / W dove:
H (mm) è l'altezza della nervatura;
W (mm) è lo spessore della parete nominale della piastra nervata.
Sull'asse sinistro delle ordinate è riportato il rapporto W_D / W dove:
W_D (mm) è lo spessore necessario a garantire i limiti di deformazione;
W (mm) è lo spessore della parete nominale della piastra nervata.
Sull'asse destro delle ordinate è riportato il rapporto BEQ / W dove:
BEQ è il rapporto B / N tra la larghezza della sezione B (mm) e il numero delle nervature N;
W (mm) è lo spessore della parete nominale della piastra nervata.
Nel diagramma relativo al comportamento tensionale (Fig. 87), sull'asse delle ascisse è riportato il rapporto H / W dove:
H (mm) è l'altezza della nervatura;
W (mm) è lo spessore della parete nominale della piastra nervata.
Sull'asse sinistro delle ordinate è riportato il rapporto W_S / W dove:
W_S (mm) è lo spessore necessario a garantire la necessaria resistenza;
W (mm) è lo spessore della parete nominale della piastra nervata.
Sull'asse destro delle ordinate è riportato il rapporto BEQ / W dove:

BEQ è il rapporto B / N tra la larghezza della sezione B (mm) e il numero delle nervature N;
W (mm) è lo spessore della parete nominale della piastra nervata.
Di seguito, si riporta un esempio di calcolo di una sezione nervata di uguale rigidezza rispetto a una sezione piana, utilizzando i grafici relativi al comportamento flessionale e alla resistenza del materiale.

Esempio di calcolo 5 (Dupont, 1990, pp. 4.24-4.25)

Le curve illustrate nelle Figg. 86 / 87 possono essere utilizzate per determinare sezioni con uguale rigidezza, nei limiti di resistenza del materiale considerato.

Dati: mensola in rame (E_C = 105000 Mpa) caricata con carico uniforme di 320 N, delle dimensioni indicate in figura.

Richiesta: mensola equivalente in resina acetalica (E = 3000 Mpa).

Lo spessore di una mensola in resina acetalica (W_D) di equivalente rigidezza è calcolata con l'equazione:

E_C x W_C^3 = E x W_D^3 e, quindi, W_D = 13 mm

Dato che uno spessore di 13 mm non è ragionevolmente realizzabile con le materie plastiche, è opportuno ipotizzare uno spessore di 3 mm, prevedendo di nervare la mensola con 9 nervature equidistanti. Quindi:

$$\frac{W_D}{W} = \frac{13}{3} = 4.33 \quad \text{e} \quad BEQ = \frac{B}{N} = \frac{100}{9} = 11.1 \quad \text{e} \quad \frac{BEQ}{W} = \frac{11.1}{3} = 3.7$$

Dalla Fig. 86 si ottiene: $\frac{H}{W} = 5.7$ e $H = 5.7 \times 3 = 17.1\text{mm}$

Dalla Fig. 87 per $\frac{BEQ}{W} = 3.7$ e $\frac{H}{W} = 5.7$ si ottiene $\frac{W_S}{W} = 2.75$ e $W_S = 8.25\text{mm}$

Per la sezione nervata avremo, quindi, come momento di inerzia (I) e momento resistente (Z):

$$I = B\frac{W^3{}_D}{12} = \frac{100 \times 13^3}{12} = 18300\text{mm}^4 \qquad Z = \frac{BW^2{}_S}{6} = \frac{100 \times 8.25^2}{6} = 1130\text{mm}^3$$

La freccia massima all'estremo libero (d), lo sforzo massimo all'incastro (s):

$$\delta_{max} = \frac{FL^3}{8EI} = \frac{320 \times 250^3}{8 \times 3000 \times 18300} = 11.4\text{mm} \quad \sigma_{max} = \frac{FL}{2Z} = \frac{320 \times 250}{2 \times 1130} = 35.4\text{MPa}$$

Essendo la resistenza massima della resina acetalica pari a 69 MPa, otteniamo un fattore di sicurezza accettabile pari a 2. In caso contrario avremmo dovuto aumentare lo spessore W_D o il numero di nervature.

4.2.3 Le nervature di supporto

Le nervature di supporto servono come rinforzo per pareti ad angolo, pareti laterali di spessore ridotto, oppure per borchie o incastri. Per progettare correttamente le nervature di supporto è necessario seguire i seguenti principi (GE Plastics, 1994, p. 46):

- lo spessore della nervatura di supporto deve essere compreso tra il 50% e il 70 % dello spessore della parete nominale del componente (Tav. 8);
- la distanza minima tra i lati di due nervature di supporto consecutive deve essere pari al doppio dello spessore della parete nominale del componente (Tav. 8);
- la lunghezza minima del lato della nervatura di supporto collegato alla parete principale del componente deve essere pari al doppio dello spessore della parete nominale del componente (Tav. 8);
- vanno previsti ampi raggi di raccordo alle estremità della nervatura di supporto, così come un angolo di sformatura di almeno 0.5°;
- il lato della nervatura di supporto collegato a una borchia deve essere lungo minimo quattro volte lo spessore della parete nominale del componente.

4.2.4 Le borchie

Le borchie si presentano come parti in rilievo rispetto alla parete nominale del componente, con funzione di sedi per agganci, viti e raccordi, utilizzati per il montaggio meccanico del manufatto, oppure come distanziatori quando si debbano unire tra loro due o più superfici. Per questo motivo le borchie sono sottoposte a pressioni, che non si riscontrano in altre zone del manufatto, dovute all'inserimento di giunti, perni, viti automaschianti: tali sollecitazioni possono essere eccessive e portare a rottura la borchia, compromettendo la stabilità del manufatto in esercizio. Questo problema può essere ridotto seguendo alcuni principi generali in fase di progettazione (GE Plastics, 1994, p. 48):

- lo spessore della parete della borchia non deve superare il 60 % dello spessore della parete nominale del componente (Tav. 9); tale spessore è il massimo consentito per evitare segni di risucchio sulla parete nominale;

- il diametro esterno della borchia deve essere il doppio di quello interno (GE Plastics, 1989[1], p. 53) (Tav. 9);
- l'altezza del profilo della borchia non deve superare di 2.5 volte lo spessore della parete nominale del componente (Tav. 9);
- il fondale della borchia, a contatto con la parete nominale, deve avere spessore compreso tra la metà e i tre/quarti dello spessore della parete nominale del componente (GE Plastics, 1989[1], p. 53) (Tav. 9).
- la resistenza della borchia può essere migliorata, non potendo aumentare lo spessore di parete, con delle nervature di supporto, che devono avere una lunghezza di contatto con la parete pari ad almeno quattro volte lo spessore della parete nominale del componente (Tav. 10);
- dato che le sollecitazioni esercitate sulla borchia si possono trasmettere anche sulla parete nominale, è necessario raccordare quest'ultima alla base della borchia stessa con un raggio pari al 25 % dello spessore della parete nominale del componente (Tav. 10);
- se si collega la borchia con le pareti adiacenti del componente, si aiuta lo sfogo dell'aria durante la fase di riempimento dello stampo (evitando la formazione di vuoti) e si aumenta la sua resistenza (Tav. 11); occorre evitare giunzioni di spessore eccessivo che potrebbero dar luogo a vuoti o segni di ritiro sulle pareti esterne (Dupont, 1990, p. 3.4) (Tav. 11);
- occorre, inoltre, prestare attenzione a non collegare direttamente la borchia alla parete, ma utilizzare nervature di pari spessore; ciò evita la formazione di segni di risucchio sulle pareti adiacenti del componente (Tav. 12).

4.2.5 Le cavità di alleggerimento e i fori

Le cavità di alleggerimento vengono ottenute per mezzo di anime d'acciaio inserite negli stampi, in modo da diminuire o eliminare il materiale presente in una parte particolare del manufatto, oppure per mantenere spessori di parete nominale uniformi. Intorno alle cavità avviene però un ritiro differenziato rispetto alla parete nominale del componente, con creazione di tensioni residue relativamente elevate: per ridurre questo inconveniente, sono preferibili cavità di forma circolare dove le tensioni si distribuiscono in modo più uniforme.

La presenza di cavità nel manufatto ha come conseguenza la cosiddetta "linea di giunzione" che si forma dove il fuso si ricongiunge dopo l'anima inserita nello stampo: questa zona rimane più debole del resto del componente e può rappresentare un difetto estetico (Tav. 13). Questo problema può essere ridotto seguendo alcuni principi generali in fase di progettazione (Dupont, 1990, pp. 3.4-3.5; GE Plastics, 1994, p. 50):

- la distanza minima tra i bordi di due cavità deve essere maggiore del doppio dello spessore della parete nominale del componente e, comunque, non inferiore al diametro della cavità (Tav. 14);
- per le cavità poste vicino al bordo del componente, la distanza minima tra il bordo della cavità e quello del componente deve essere superiore al doppio dello spessore della parete nominale del componente e, comunque, non inferiore al diametro della cavità (Tav. 14);
- se una cavità è prossima a una parete verticale del componente, la distanza minima tra il bordo della cavità e la parete deve essere superiore al 70 % del diametro della cavità (Tav. 14);
- per evitare che la massa fusa del polimero pieghi l'anima di acciaio durante il flusso di stampaggio, la profondità di una cavità a fondo cieco non deve superare tre volte il suo diametro (Tav. 15); per le cavità di piccolo diametro (< 6 mm) (GE Plastics, 1989[1], p. 52), il rapporto tra lunghezza e diametro deve essere pari a due; il fondello della cavità cieca deve essere superiore a 1/6 del diametro, onde evitare fenomeni di scollamento (Tav. 15);
- nel caso la cavità a fondo cieco necessiti di profondità maggiori allo spessore della parete nominale del componente, occorre provvedere a un fondello di spessore pari alla parete nominale, opportunamente raccordato (Tav. 15);
- se la cavità è passante, in quanto destinata per il fissaggio meccanico tra il componente e un materiale diverso, sono necessarie idonee tolleranze, tali da assorbire la dilatazione e la contrazione dei due materiali; il diametro della cavità deve essere superiore del 20-40 % a quello dell'elemento di fissaggio, tenuto conto delle temperature d'esercizio e dei coefficienti di dilatazione dei materiali impiegati.

4.2.6 Gli intagli e la concentrazione delle tensioni

Gli intagli sono definiti come cambiamenti più o meno bruschi della sezione (cavità, fori, filettature, variazioni di spessore, curvature) (Tav. 16) o della composizione del materiale (cariche, additivi, soffiature), cambiamenti che generano una variazione di direzione del flusso di forze in un elemento sollecitato, con un conseguente loro addensamento (Hoechst, 1979[1], pp. 7-9; 1986, pp. 14-15) (Tav. 16, Part. 1).
La concentrazione locale delle tensioni in seguito a tale addensamento viene definita "effetto d'intaglio" e genera una distribuzione non uniforme delle tensioni nella sezione del manufatto sollecitato che può influire in maniera notevole sulla sua resistenza.
Nei casi sopradescritti è opportuno calcolare le sollecitazioni d'esercizio facendo uso di un fattore di moltiplicazione, che tiene conto delle tensioni concentrate rispetto alle sollecitazioni uniformi globali, definito "fattore di concentrazione delle tensioni" (a_K): è possibile ricavare il fattore di concentrazione delle tensioni in base al rapporto tra il raggio di raccordo (R) e lo spessore della parete più sottile (T) presente in prossimità dell'elemento (Fig. 88).
In base al fattore di concentrazione delle tensioni, la massima tensione in esercizio (σ_{MAX}) è data dalla seguente relazione:

$$\sigma_{MAX} = \alpha_K \cdot \sigma_N \qquad (4.5)$$

dove:
σ_N (N/mm^2) è la sollecitazione media nella sezione;
α_K è il fattore di concentrazione delle tensioni (Fig. 88).
Sul fattore di concentrazione delle tensioni (a_K) influisce in modo considerevole la forma dell'intaglio, nel senso che più è acuto l'intaglio (quanto più piccolo è il suo raggio) maggiore diventa a_K (Hoechst, 1986, p. 15) (Tav. 17).
Dunque, per effetto della sensibilità all'effetto d'intaglio delle materie plastiche, è buona regola, come già detto più volte in precedenza, inserire abbondanti arrotondamenti e raggi di raccordo nelle aree in cui sono presenti improvvise variazioni di spessore o direzione.
L' effetto d'intaglio riduce tra l'altro:

- la resistenza di forma;
- la tenacità;
- la resistenza alla rottura per scorrimento interno ("creep").

4.2.7 L'angolo di sformatura

L'angolo di sformatura deve facilitare l'estrazione del componente dallo stampo, per ovvie considerazioni sui tempi di lavorazione, e va previsto in modo adeguato in fase di progettazione (GE Plastics, 1994, p. 50):

- per componenti con superficie liscia è sufficiente prevedere un angolo di sformatura compreso tra 0.25° e 2° per lato, sia nelle pareti interne che in quelle esterne (Tav. 18);
- per componenti con superficie goffrate (rilievi, texture) l'angolo di sformatura deve essere aumentato di 0.4° per ogni 0.01 mm di profondità della goffratura;
- per manufatti con sagoma particolarmente complessa e profonda, si possono avere angoli di sformatura fino a 10° (Tav. 18).

È possibile ricavare dei rapporti utili tra profondità della sagoma e invito (Fig. 89), rapporti che permettono di definire in modo semplice i vari angoli di sformatura (GE Plastics, 1989[1], p. 54).

4.2.8 I giunti a incastro elastico

I giunti a incastro elastico costituiscono una tecnica di montaggio particolarmente adatta ai componenti in plastica, in quanto molte materie plastiche sopportano per breve tempo valori di allungamento molto elevati senza rotture o senza deformazioni permanenti. I giunti a incastro elastico possono essere progettati in maniera diversa, a seconda che siano destinati a essere smontati più volte oppure a rimanere sempre innestati: la variabile è la lunghezza del giunto elastico che, nel primo caso, sarà più contenuta (rigido) e, nel secondo caso, sarà elevata (molleggiato) (Saechtling, 1993, pp. 174-177) (Fig. 90).

Esistono diversi giunti a incastro elastico, classificabili in tre categorie:

- giunti a sbalzo;
- giunti cilindrici;
- giunti sferici.

Per quanto concerne il meccanismo a sbalzo è, tra tutti, il più utilizzato: questo tipo di giunto è costituito da una sporgenza rispetto alla parete nominale del componente, che reca all'estremità libera un gancio per l'assiemaggio del pezzo quando viene inserito in una rientranza del contropezzo.

Una progettazione corretta di questo tipo di giunto deve considerare i seguenti principi (GE Plastics, 1994, pp. 54-55):

- la deformazione calcolata indotta nel materiale deve essere, di norma, inferiore al 5 % per i materiali non rinforzati (1-2 % per i materiali rinforzati con fibre di vetro); questo valore è superiore a quelli normalmente consigliati, ma viene considerato ammissibile perché interessa un'area circoscritta della sezione e viene generalmente compensato dalla flessibilità della parete di attacco del giunto;
- è possibile utilizzare una trave a sezione rastremata; ciò permette di ridurre la deformazione massima del giunto e la quantità di materiale impiegato; il rapporto consigliato tra l'altezza della sezione rastremata all'estremità libera (h_l) e l'altezza della sezione all'attacco con la parete nominale del componente (h) è 1 : 2 (Tav. 20);
- per limitare la concentrazione delle tensioni, alla base della trave è necessario un raggio di raccordo minimo pari al 40 % dell'altezza della sezione all'attacco con la parete nominale del componente (h) (Tav. 19 e Tav. 20);
- l'assemblaggio va posizionato in relazione alla flessibilità della parete nominale, perchè questo permette di limitare la sollecitazione sulla sezione più lontana;
- l'altezza della sezione all'attacco con la parete nominale del componente (h) non deve superare il 60 % dello spessore della parete nominale del componente, in modo da non provocare segni di risucchio (Tav. 19 e Tav. 20);
- la freccia (f) del giunto (dente d'incastro), in linea di principio, può essere calcolata, dopo aver stabilito la lunghezza del giunto (l) e l'altezza della sezione all'attacco con la parete nominale del componente (h), con la seguente formula:

$$f \cong 0.03 \cdot \frac{l^2}{h} \cdot K \qquad (4.6)$$

  dove:

  K è un coefficiente di proporzionalità che tiene conto del rapporto tra l'altezza della sezione rastremata all'estremità libera (h_l) e l'altezza della sezione all'attacco con la parete nominale del componente (h) (Fig. 91).
- la freccia (f) del giunto non deve superare il 50 % della lunghezza (l).

Esistono equazioni per calcolare la deformazione indotta dalla freccia imposta di progetto (dente), per giunti a sezione trasversale costante (Tav. 19), per giunti a sezione trasversale rastremata (Tav.

20) e per giunti a resistenza uniforme (Tav. 21). In tutti e tre i casi, lo schema statico, utilizzato per il calcolo della deformazione ammissibile, è quello della mensola incastrata, di sezione b (mm) x h (mm) e lunghezza l (mm), sul cui estremo libero agisce una forza Q (N) necessaria a garantire lo spostamento (freccia) f (mm) per l'incastro del dente del giunto nel contropezzo. Secondo questo schema statico la sollecitazione nella sezione di attacco tra giunto e parete nominale è:

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{I} \qquad (4.7)$$

dove:
M = (Q x l) è il momento flettente (N x mm) all'incastro;
y = (h / 2) è la distanza (mm) dall'asse neutro della fibra più sollecitata;
I = (bh^3) / 12 è il momento d'inerzia (mm^4) della sezione rettangolare del giunto.
La freccia massima all'estremità libera del giunto è:

$$f = \frac{Q \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot I} \qquad (4.8)$$

dove:
f (mm) è la freccia pari al dente del giunto;
Q (N) è il carico necessario a far abbassare il giunto della quantità f pari al dente dell'incastro;
l (mm) è la lunghezza del giunto tra la parete nominale e il dente;
E (N/mm^2) è il modulo elastico del materiale utilizzato;
I = (bh^3) / 12 è il momento d'inerzia (mm^4) della sezione rettangolare del giunto.

La deformazione ε è data dalla seguente equazione:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{M \cdot y}{I \cdot E} \qquad (4.9)$$

$$\varepsilon = \frac{Q \cdot l \cdot y}{I \cdot E} \qquad (4.10)$$

ed essendo il carico Q (N), necessario a garantire la freccia f (mm), secondo l'equazione (4.8) uguale a:

$$Q = \frac{3 \cdot f \cdot E \cdot I}{l^3} \qquad (4.11)$$

sostituendo nella (4.10), otteniamo:

$$\varepsilon = \frac{3 \cdot f \cdot h}{2 \cdot l^2} \qquad (4.12)$$

che è l'equazione per calcolare la deformazione indotta dalla freccia imposta, per giunti a sezione trasversale costante (GE Plastics, 1994, p. 54).
Nel caso dei giunti a sezione trasversale rastremata, l'equazione (4.12) diventa (GE Plastics, 1994, p. 54):

$$\varepsilon = \frac{3 \cdot f \cdot h}{2 \cdot l^2 \cdot K} \qquad (4.13)$$

Per il rapporto $h_l/h = 1/2$ la (4.13) diventa (Saechtling, 1993, p. 177):

$$\varepsilon = \frac{f \cdot h}{1.09 \cdot l^2} \qquad (4.14).$$

Nel caso dei giunti a resistenza uniforme, l'equazione (4.12) diventa, per uno spessore all'estremità pari a 1/4 di quello all'aggancio con la parete nominale (Saechtling, 1993, p. 177):

$$\varepsilon = \frac{f \cdot h}{0.86 \cdot l^2} \qquad (4.15)$$

Quindi, in base alle equazioni (4.12), (4.13) e (4.15), una volta stabilite la lunghezza del giunto a incastro elastico, le dimensioni della sua sezione e le dimensioni del dente d'incastro (freccia massima), è possibile determinare il valore della deformazione indotta e verificare che esso sia inferiore al valore ammissibile pari al 5 %.
Per quanto concerne i giunti cilindrici (Dupont, 1990, pp. 9.8-9.9), essi sono generalmente più resistenti di quelli a sbalzo e richiedono, quindi, materiali più resistenti: questi giunti funzionano sul medesimo concetto di quelli a sbalzo, solo che in questo caso la sporgenza che funziona da incastro si trova sul contropezzo, mentre sul giunto è ricavata la rientranza.

È buona regola prevedere sulla testa dell'inserto e all'interno dell'attacco degli smussi d'invito a 45° (Tav. 22). Inoltre, vanno rispettate le proporzioni corrette tra il diametro esterno dell'attacco (D), il diametro esterno dello spinotto (d) e il dente dell'incastro (e) (Tab. 17). Il giunto sferico (Dupont, 1990, pp. 9.8-9.9) (Tav. 22), infine, si può considerare una variazione del giunto cilindrico, per cui valgono le stesse proporzioni (Tab. 17).
Per una corretta progettazione dei giunti cilindrici e sferici valgono le considerazioni fatte nel successivo paragrafo 4.2.9 relativo ai giunti a pressione.

Tab. 17 Rapporti dimensionali per giunti a incastro elastico cilindrici e sferici
Si evidenziano i rapporti dimensionali consigliati per la progettazione di giunti a incastro elastico cilindrici e sferici. Sono indicati il diametro esterno dello spinotto (d), il diametro esterno dell'attacco (D) e il dente dell'incastro (e) (Dupont, 1990, p. 9.9).

d (mm)	D max (mm)	e (mm)
2	5	0.05
3	8	0.07
4	10	0.10
5	11	0.12
10	17	0.25
15	22	0.35
20	28	0.50
25	33	0.65
30	39	0.80

4.2.9 I giunti a pressione

L'accoppiamento a pressione è una tecnica di assemblaggio che permette di collegare due componenti senza utilizzare adesivi o altri metodi. Affinché ciò possa accadere il diametro dello spinotto deve essere leggermente superiore al diametro interno dell'attacco; questa differenza di diametro viene detta "interferenza dimensionale". Dunque, questo tipo di giunto consente di utilizzare insieme materiali simili o diversi, per ottenere assemblaggi affidabili a basso costo (GE Plastics, 1994, pp. 74-75).
Il valore dell'interferenza dimensionale richiede considerazioni molto accurate, in quanto interferenze insufficienti generano una scarsa resistenza del giunto, mentre interferenze troppo elevate provocano

nel materiale eccessive sollecitazioni che possono causarne una rottura precoce. Inoltre, nel caso di sbalzi termici, occorre considerare i coefficienti di dilatazione termica dei materiali impiegati, tenuto conto che l'interferenza è inversamente proporzionale alla temperatura. L'aumento della temperatura, quindi, riduce la resistenza del giunto e la sua diminuzione accresce la sollecitazione nel materiale, esponendolo a precoci rotture. Un altro elemento da considerare è la resistenza a lungo termine del giunto, per cui si dovrà tener conto del rilassamento del materiale nel tempo, utilizzando il modulo di scorrimento riferito a determinate condizioni di tempo e temperatura.
Una progettazione corretta di questo tipo di giunto deve considerare i seguenti principi (GE Plastics, 1989[1], p. 61):

- prevedere una pressione di accoppiamento uguale o inferiore al limite di elasticità del materiale;
- usare spinotti arrotondati e lisci;
- pulire bene lo spinotto e l'attacco da eventuali sostanze e impurità;
- evitare linee di saldatura in corrispondenza delle borchie destinate a ricevere gli spinotti;
- evitare spinotti zigrinati, perché possono causare fenomeni d'intaglio;
- lo spinotto deve penetrare nell'attacco per una profondità pari a due volte il diametro esterno dello spinotto stesso (Dupont, 1990, p. 9.7) (Tav. 23).

L'interferenza massima di montaggio, rispetto ai limiti di resistenza del materiale utilizzato, si può calcolare, in generale, usando l'equazione di Lame per cilindri a pareti spesse (GE Plastics, 1989[1], p. 61):

$$I_D = \frac{\sigma_{amm} \cdot d}{\beta} \cdot \left(\frac{\beta + \nu_A}{E_A} + \frac{1 - \nu_I}{E_I} \right) \qquad (4.16)$$

dove:
I_D (mm) è l'interferenza diametrale (d - d_1);
s_{amm} (N/mm^2) è la sollecitazione di progetto, data dal rapporto carico di snervamento/fattore di sicurezza;
d (mm) è il diametro esterno dello spinotto;

b è il fattore di forma uguale al rapporto $\frac{1+\left(\frac{d}{D}\right)^2}{1-\left(\frac{d}{D}\right)^2}$;

D (mm) è il diametro esterno dell'attacco;
n_A è il coefficiente di Poisson del materiale dell'attacco;
n_I è il coefficiente di Poisson del materiale dello spinotto;
E_A (N/mm^2) è il modulo a trazione del materiale dell'attacco;
E_I (N/mm^2) è il modulo a trazione del materiale dello spinotto.
In base all'equazione (4.16) è stato ricavato il grafico della relazione tra il rapporto dei diametri dello spinotto e dell'attacco e l'interferenza diametrale massima, sia nel caso plastica/plastica che in quello acciaio/plastica (Fig. 92).
Nel caso lo spinotto e l'attacco del giunto a pressione siano entrambi in materiale plastico l'equazione (4.16) si semplifica e diventa (GE Plastics, 1994, p. 74):

$$I_D = \frac{\sigma_{amm} \cdot d}{E} \cdot \frac{\beta + 1}{\beta} \qquad (4.17)$$

Invece, nel caso lo spinotto sia in acciaio o comunque in un materiale con modulo elastico maggiore di 50 x 10^3 N/mm^2, il secondo termine tra parentesi dell'equazione (4.16) diventa trascurabile.
L'equazione (4.16) diventa, dunque (GE Plastics, 1994, p. 74):

$$I_D = \frac{\sigma_{amm} \cdot d}{E_A} \cdot \frac{\beta + \nu_A}{\beta} \qquad (4.18)$$

La forza di accoppiamento del giunto si può calcolare, in prima approssimazione, moltiplicando la pressione nel punto di contatto, l'area di contatto e i coefficienti di attrito dei materiali utilizzati, secondo l'equazione (GE Plastics, 1989[1], p. 61):

$$F = P \cdot A \cdot \mu_0 = P \cdot \pi \cdot d \cdot l \cdot \mu_0 \qquad (4.19)$$

dove:
F (N) è la forza di accoppiamento;
P (N/mm^2) è la pressione nel punto di contatto, data dal rapporto:

s_{amm}/b;

A (mm^2) è l'area di contatto;
μ_0 è il coefficiente d'attrito;
d (mm) è il diametro esterno dello spinotto;
l (mm) è la lunghezza del giunto a pressione.
La variazione del diametro dello spinotto e/o dell'attacco per effetto della dilatazione termica a temperature elevate si può calcolare con la seguente equazione (Dupont, 1990, p. 9.7):

$$D_T - D_0 = \alpha \cdot (T - T_0) \cdot D_0 \qquad (4.20)$$

dove:
D_T (mm) è il diametro alla temperatura T;
D_0 (mm) è il diametro alla temperatura T_0;
a (°C x 10^{-6} x K^{-1}) è il coefficiente di dilatazione termica del materiale;
T (°C) è la temperatura d'esercizio e T_0 (°C) è la temperatura iniziale.

4.3 La progettazione di profili estrusi

L'uniformità di parete, i problemi e i vantaggi - I vuoti e le cavità - Gli angoli e i raccordi, i punti d'intaglio.

L'estrusione, con le sue varie opzioni (coestrusione, soffiaggio, calandratura) è, per volume di produzione, la tecnologia di produzione di manufatti in materiale plastico più importante: si tratta di una tecnologia di tipo continuo, attraverso la quale si ottengono svariate tipologie di profili (Tav. 24).
Il concetto di funzionamento è molto semplice ed è basato sul passaggio della massa riscaldata e fusa del polimero attraverso una filiera, cioè una sagoma opportunamente forata e disegnata, e sulla successiva calibratura e raffreddamento in bagno umido del profilato. Si ottengono così oggetti di lunghezza illimitata e di sezione corrispondente alla testa dell'estrusore fino a 1.5 m di diametro, film sino a 8 m di larghezza, lastre sino a 3.5 m; la lunghezza viene limitata solo dalle possibilità di trasporto (per esempio i profilati per finestre in polivinilcloruro -PVC - arrivano a 6 m di lunghezza) (Saechtling, 1993, p. 15).
Oltre al rispetto di parametri di lavorazione come la velocità di estrusione, di raffreddamento e di calibratura, per la riuscita ottimale

di un profilo estruso è necessario rispettare alcuni principi progettuali che consentono, a prescindere dalla forma specifica del pezzo, di ottenere un manufatto efficiente dal punto di vista prestazionale, funzionale e visivo. Il campo dei profili estrudibili è praticamente illimitato, ma per realizzare un progetto ottimale ed economicamente vantaggioso, bisogna dare particolare attenzione a parametri quali:

- l'uniformità delle pareti;
- i vuoti e le cavità;
- gli angoli e i raccordi.

4.3.1 L'uniformità delle pareti

L'uniformità delle pareti del profilo da estrudere è la più importante delle considerazioni da effettuare (Beck, 1980, pp. 286-287):

- un profilo a pareti uniformi è più facile da estrudere, mentre, pareti diseguali causano variazioni nel flusso del materiale fuso tra porzioni larghe e porzioni piccole del profilo;
- pareti non uniformi, e più spesse, risultano più difficili da controllare dimensionalmente;
- pareti uniformi permettono un migliore e più facile controllo dell'intero processo, con possibilità di ottenere forme più complesse;
- con un attento progetto del profilo è possibile ottenere le medesime caratteristiche funzionali, prestazionali (rigidezza) e la medesima forma, mantenendo le pareti uniformi; generalmente questo si ottiene con l'inserimento di cavità e sottosquadri per eliminare le parti spesse (Tav. 25);
- a volte, invece, la disuniformità delle pareti è condizione necessaria per l'efficienza del profilo, come nel caso sia necessaria particolare flessibilità (Tav. 26);
- sezioni fini raffreddano più velocemente di sezioni spesse con conseguente formazione di autotensioni e deformazioni nella parte più spessa;
- nel caso di nervature, come per le forme stampate, si possono formare segni di risucchio dovuti al raffreddamento più lento della zona di giunzione; ciò può essere evitato prevedendo un adeguato disegno, una contronervatura oppure una dentellatura esterna (Tav. 27).
- lo spessore minimo consigliato è 0.5 mm.

4.3.2 I vuoti e le cavità

Le sezioni vuote o cave non presentano particolari problemi progettuali: le difficoltà derivano da un aumento dei costi di lavorazione notevole, in quanto per generare un vuoto durante l'estrusione occorre insufflare aria internamente all'estrusore, inserire dei mandrini interni, lavorare sottovuoto per mantenere il vuoto nel profilo sino a che non è sufficientemente raffreddato. Dal punto di vista progettuale bisogna considerare che (Beck, 1980, pp. 288-291):

- per ottenere una cavità circolare, le pareti esterne devono essere uniformi; in caso contrario ritiri differenziati generano deformazioni non preventivate (Tav. 28).
- è sconsigliato inserire sporgenze o diramazioni entro una cavità, in quanto non sono dimensionalmente controllabili durante il raffreddamento; la massima sporgenza interna ammessa è pari allo spessore della parete esterna (Tav. 28).

4.3.3 Gli angoli e i raccordi

Come per le forme stampate, anche nell'estrusione di profili bisogna evitare gli spigoli vivi in quanto sono impossibili da ottenere nella lavorazione e, comunque, rappresentano pericolosi punti d'intaglio; inoltre raggi di raccordo elevati permettono un migliore flusso del materiale e minimizzano le deformazioni.
Accorgimenti progettuali sono:

- al fine di evitare la formazione di punti di rottura precoci, mantenere un raggio di raccordo minimo pari a 0.4 mm per profili spessi da 0.5 a 1 mm, pari a 0.8 mm per profili spessi da 1 a 2 mm, pari a 1.5 mm per profili di spessore superiore a 2 mm (Tav. 29);
- un raccordo ottimale è quello che prevede un diametro interno uguale allo spessore della parete; inoltre è consigliabile che raccordo interno e raccordo esterno del profili abbiano il medesimo centro (Tav. 29).

4.4 La progettazione di componenti riciclabili

La semplicità di smontaggio, il basso numero di componenti, la plurifunzione, l'omomaterialità, i giunti elastici.

La progettazione di componenti totalmente riciclabili è, chiaramente, un obiettivo molto importante quanto difficile da raggiungere, soprattutto se si guarda ai vincoli di carattere normativo, tecnologico ed estetico che limitano la definizione del componente e la scelta dei materiali. La condizione essenziale per la facilità di riciclaggio è la semplicità di smontaggio, che deriva in maniera decisiva dalle scelte del progettista e dalle tecniche di assemblaggio. Il rispetto di questo requisito comporta l'utilizzo di un numero limitato di componenti, possibilmente plurifunzionali e di forma semplice, e l'impiego di meccanismi di montaggio quali i giunti a incastro elastico o a pressione, che permettono la facile e ripetuta diassemblabilità. I principi che possono rappresentare una guida per la progettazione di componenti riciclabili sono (GE Plastics, 1994, p. 76):

- evitare di usare nei componenti in plastica inserti metallici, che inquinano il prodotto riciclato e sono difficilmente separabili;
- evitare di utilizzare viti automaschianti, sostituendole con giunti a scatto elastico; in caso contrario prevedere meccanismi di rottura che permettano di asportare totalmente la parte metallica (Fiocca, 1993) (Fig. 93);
- evitare di utilizzare tecniche di incollaggio con prodotti a base di poliestere e poliuretano che inquinano il materiale; le parti o i componenti che presentano parti incollate devono essere facilmente separabili dal resto del manufatto;
- utilizzare componenti di una sola famiglia di resine e di un solo tipo (omomaterialità), altrimenti marchiare con codici a barre i materiali per la loro facile identificazione;
- evitare di usare vernici e lacche protettive; è meglio sfruttare la colorabilità della massa fusa del polimero.

Note di approfondimento

1. In merito ai *principi guida per la progettazione di manufatti con le materie plastiche*, esiste una abbondante letteratura su questo argomento, prodotta dalle principali multinazionali del settore in funzione di assistenza tecnica alla clientela. Si tratta di veri e propri manuali di progettazione, dai quali sono stati tratti gli esempi considerati in questo capitolo; in particolare si consigliano: i testi della Hoechst Italia S.p.A., *Materie plastiche per uso tecnico. Basi di calcolo, dati caratteristici, esempi di calcolo*, 1979; *Materie plastiche per uso tecnico. Calcolo per assemblaggio mediante forzatura*, 1979; *Materie plastiche per uso tecnico. Saldatura a ultrasuoni di materie plastiche per uso tecnico*, 1980; *Materie plastiche per uso tecnico. Progettazione di manufatti con materie plastiche tecniche*, 1986, *Technical Plastics. Outsert moulding with Hostaform*, 1987, Milano; della GE Plastics, *Guida alla progettazione funzionale ed economica*, 1989; *Guida ai principi di progettazione con i tecnopolimeri*, 1994; *Design Guide*, 1996, Cinisello Balsamo (MI) e della Dupont, *Design Handbook*, 1990, Cologno Monzese (MI).
2. Per quanto concerne *l'analisi delle prestazioni di un manufatto in materiale plastico*, occorre sottolineare che, per la forte dipendenza dalle condizioni di lavorazione, questa non può esaurire la parte progettuale del manufatto: è necessario, infatti, procedere alla realizzazione di prototipi e al ricorso a tecniche computerizzate per valutare appieno l'influenza dei parametri di trasformazione (GE Plastics, 1994, pp.7-8). Tra le tecniche informatiche utilizzate vi è l'analisi dello scorrimento che, attraverso simulazioni del flusso del fuso polimerico nello stampo, permette di determinare in modo ottimale la posizione e il numero dei punti di iniezione, le dimensioni dei canali di alimentazione e l'ubicazione delle linee di giunzione. Tra le prove sui prototipi o sui prodotti finiti, vi sono: l'analisi con rilevatori di deformazione, l'analisi con vernici fragili, la fotoelasticità, l'analisi delle sollecitazioni per emissione termica, il controllo con raggi infrarossi per la determinazione del calore radiante, le camere ambientali per la simulazione dei cicli termici, le prove di durata in condizioni d'uso simulate, l'invecchiamento accellerato in condizioni di temperatura, umidità o radiazioni ultraviolette elevate e, infine, l'olografia.
3. In riferimento *all'analisi strutturale*, solo se il manufatto risulta molto complesso, può essere conveniente ricorrere ai sistemi di calcolo per elementi finiti, sistemi che suddividono il manufatto in porzioni elementari senza soluzione di continuità (bi e tri-dimensionali), il cui comportamento deformazionale viene descritto con opportune funzioni approssimate.
4. Confronta Capitolo 2, nota 2.

Capitolo 5
L'APPROCCIO METAPROGETTUALE

In questo capitolo si illustrano tre soluzioni metaprogettuali relative all'impiego di materie plastiche di riciclo nella realizzazione di componenti edilizi: si tratta di proposte, elaborate sulla base delle esperienze e delle conoscenze maturate nel lavoro di preparazione della tesi, che riguardano, in generale, tutto il campo del riciclo, in quanto considerano sia la famiglia dei polimeri termoplastici di massa, in particolare il polivinilcloruro (PVC), sia la famiglia dei tecnopolimeri, in particolare il polifenilossido (PPO), sia le plastiche eterogenee.
La prima proposta riguarda un elemento estruso in polivinilcloruro (PVC) rigido riciclato, elemento utilizzabile per realizzare solai attrezzabili o ispezionabili, in sostituzione delle pignatte in laterizio tradizionalmente usate insieme al calcestruzzo (Par. 5.1). La seconda proposta, invece, riguarda un sistema di elementi estrusi in plastica eterogenea, elementi destinati alla realizzazione di tramezze divisorie mobili per interni (Par. 5.2). La terza proposta, infine, è quella di un sistema di pannelli stampati e di montanti estrusi, entrambi in polifenilossido (PPO), destinati al tamponamento esterno di edifici (Par. 5.3).
Nelle tre proposte l'approccio è metaprogettuale, inteso, quindi, a illustrare le possibilità applicative dei polimeri di riciclo e a verificare, in esempi pratici, i parametri progettuali definiti nei precedenti capitoli. Le proposte di seguito indicate sono da ritenersi, dunque, puramente indicative: infatti, come già ripetuto (Par. 2.3 e Par. 4.1), la progettazione con le materie plastiche, pur nel rispetto dei corretti parametri progettuali e delle caratteristiche del materiale, impone, sempre, una verifica a livello di prototipo, in quanto esistono parametri relativi alla lavorazione e al processo di trasformazione che possono essere ponderati solo attraverso prove su manufatti finiti. Da ciò deriva che, per correttezza scientifica, le proposte

formulate rientrino nella sfera metaprogettuale, fermo restando che, comunque, sono state valutate e verificate le reali possibilità di utilizzo, nelle condizioni di esercizio, per ognuno dei sistemi considerati.

5.1 Elemento estruso in polivinilcloruro (PVC) rigido riciclato

Questo elemento, da un punto di vista concettuale, svolge analoghe funzioni rispetto alle comuni pignatte in laterizio utilizzate nei solai in latero-cemento (Tav. 31): rispetto a queste, però, il manufatto in materiale plastico offre, a parità di prestazioni, un peso inferiore (il peso dell'elemento per metro quadrato è sette volte inferiore a quello del laterizio, 10 kg/mq contro 73 kg/mq per una pignatta di altezza 200 mm) permettendo, quindi, una migliore movimentazione e una diminuzione dei carichi permanenti agenti sul solaio; la formabilità delle materie plastiche consente, inoltre, di definire una serie di incastri che favoriscono l'assemblaggio e la flessibilità funzionale del componente.
Dal punto di vista materico, per realizzare questo elemento è stato scelto il polivinilcloruro (PVC) in quanto, oltre a essere il polimero più diffuso in edilizia, garantisce bassi livelli di degradazione durante le operazioni di riciclo e, tra le materie termoplastiche di massa riciclate, è quello che presenta il miglior rapporto costo/prestazioni (Par. 3.3.1; Par. 3.3.4 e Par. 3.4.9); inoltre, per quanto concerne il comportamento al fuoco (Par. 2.4), il polivinilcloruro (PVC) non brucia in assenza di fiamma d'innesco ed è classificato come autoestinguente (classe 1), comportamento che viene senz'altro migliorato dalla presenza, in questo caso particolare, di intonaco o controsoffitto che sottraggono il manufatto da un possibile contatto diretto con la causa d'innesco dell'incendio.
La sezione dell'elemento (Tav. 30 e Tav. 32 Part. D), prodotto per estrusione in modo da ottenere, in continuo, elementi di lunghezza variabile in relazione alla luce del solaio da gettare in opera, è, come per le pignatte in laterizio, di forma trapezoidale, con due alette sui lati inclinati per evitare il distacco del pezzo dal calcestruzzo in opera, e ha dimensioni d'ingombro di 200 mm (altezza) per 400 mm (larghezza): come ovvio, la lunghezza dell'elemento è funzione della luce di solaio, così come le dimensioni riportate sono indicative per uno spessore di solaio pari a 240 mm.

Internamente l'elemento è suddiviso in tre scomparti (Tav. 30), di cui:

- i due laterali sono riempiti con resina espansa (tipo "Caril" della GE Plastics), coestrusa con il PVC per garantire la resistenza a compressione dell'elemento in opera (nelle testate del solaio, dove il diagramma dei momenti flettenti si inverte e le fibre compresse sono quelle inferiori, è da tenere in conto la possibilità di riempire totalmente l'elemento con resina espansa);
- quello centrale è disponibile per eventuali impianti da posizionare all'interno del solaio (impianti idrici e di scarico, impianti elettrici, impianti di condizionamento): questa funzione, che costituisce un vantaggio rispetto alle pignatte in laterizio, è esplicata grazie a un coperchio (larghezza 250 mm) che, per mezzo di due giunti elastici (Tav. 32 bis, Part. B), può essere tolto e successivamente riposizionato.

Di fatto, con questo elemento si possono realizzare sia solai attrezzabili che solai ispezionabili:

- nel primo caso, una volta posizionati gli impianti e richiuso il coperchio, l'intradosso della soletta viene intonacato (per questo motivo, all'intradosso dell'elemento sono previste delle alette - Tav. 30 - che migliorano l'aderenza del rinzaffo);
- nel secondo caso
  l'intradosso della soletta viene controsoffittato.

Ai quattro vertici dell'elemento, per tutta la sua lunghezza, sono previsti due giunti a scatto elastico, simili a giunti cilindrici (Par. 4.2.8), rispettivamente maschio e femmina sul lato inferiore (Tav. 33) e maschio e femmina sul lato superiore (Tav. 34 e Tav. 34 bis). Questi giunti sono studiati in modo tale da permettere:

- l'unione di due elementi affiancati, nel caso del solaio (Tav. 31);
- l'unione di due elementi l'uno rovesciato rispetto all'altro, qualora si voglia utilizzarli per realizzare dei setti (Tav. 35); in questo caso, per esempio un muretto di recinzione o il setto di un locale interrato, il calcestruzzo viene gettato all'interno delle zone di connessione (per formare tanti piccoli pilastri) e/o dei comparti centrali che fungono, inoltre, da asole per impianti e scarichi.

Infine, dal punto di vista dei vantaggi funzionali, questo elemento, per luci fino a 2.5 metri, è autoportante (Par. 5.1.1) e, quindi, permette di contenere la struttura di sostegno provvisionale del solaio a quella necessaria per le travi di coronamento, per l'appoggio delle testate degli elementi estrusi e a un sostegno rompitratta ogni 2.5 metri; inoltre, le dimensioni dell'elemento

consentono considerevoli risparmi di tempo nella preparazione del fondo per il getto, evitando la posa delle singole pignatte in laterizio.

5.1.1 Calcoli strutturali

Le caratteristiche da verificare con il calcolo strutturale sono due:

- la funzione autoportante dell'elemento;
- la resistenza del giunto inferiore durante il getto.

Per quanto concerne la funzione autoportante è possibile schematizzare l'elemento come una trave in semplice appoggio sulla quale agisce un carico uniformemente distribuito, che corrisponde al peso del getto di calcestruzzo liquido (il peso proprio dell'elemento è trascurabile): con questo schema si possono verificare la freccia (f) e le sollecitazioni dovute alla flessione (s), calcolate in mezzeria della trave.
La freccia in mezzeria della trave si calcola secondo la formula:

$$f = \frac{5}{384} \cdot \frac{p \cdot l^4}{E \cdot J} \qquad (5.1)$$

dove:
f (mm) è la freccia;
p (N/mm) è il carico distribuito agente sulla trave;
l (mm) è la lunghezza della trave;
E (N/mm^2) è il modulo elastico del polivinilcloruro (PVC) rigido riciclato;
J (mm^4) è il momento d'inerzia della sezione trapezoidale della trave.

La freccia dovuta ad azioni permanenti (Decreto Ministeriale 14 Febbraio 1992, Parte Prima, punto 7.3.2, comma b) è verificata per valori pari a:

$$f \leq \frac{l}{500} \qquad (5.2)$$

dove:
l (mm) è la lunghezza della trave.
Uguagliando l'equazione (5.1) e l'equazione (5.2) si ricava la lunghezza della trave in funzione della freccia massima ammissibile:

$$\frac{5}{384} \cdot \frac{p \cdot l^4}{E \cdot J} = \frac{l}{500}$$

$$l = \sqrt[3]{\frac{384}{5 \cdot 500} \cdot \frac{E \cdot J}{p}} \qquad (5.3)$$

Gli sforzi nella trave inflessa si calcolano secondo la formula:

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{J} \qquad (5.4)$$

dove:
s (N/mm^2) è lo sforzo;
M (kN x mm) è il momento flettente agente sulla trave;
y (mm) è la distanza dall'asse neutro;
J (mm^4) è il momento d'inerzia della sezione trapezoidale della trave.
La sollecitazione così calcolata deve essere inferiore alla resistenza a flessione del polivinilcloruro (PVC) rigido riciclato che è pari 70 N/mm^2 (considerando in sicurezza il valore minore della resistenza a flessione del polivinilcloruro vergine) (Par. 2.2, Tab. 5).
Per applicare le formule (5.3) e (5.4) occorre calcolare il momento d'inerzia della sezione della trave e la distanza delle fibre più lontane dall'asse neutro: in tal senso, può risultare utile, ai fini di un calcolo di massima, considerare una sezione semplificata dell'elemento estruso, composta dal lato superiore, dai due lati inclinati e dal lato inferiore privato, però, del coperchio che, a causa dei giunti che lo collegano al resto dell'elemento, non partecipa all'inerzia della sezione sottoposta a flessione; nel calcolo, per le pareti considerate viene utilizzato uno spessore maggiorato a 8 mm, per compensare le parti della sezione tralasciate. L'inerzia della sezione così calcolata è:

$$J = 3542 \cdot 10^4 \ mm^4$$

Nella sezione inflessa, le fibre più sollecitate sono le fibre tese inferiori, in quanto, rispetto al bordo inferiore, il baricentro della sezione, e quindi la posizione dell'asse neutro, si trova a una distanza pari a:

$$y = 111.25 \ mm$$

Il carico uniformemente distribuito, che agisce sulla trave, corrisponde al peso del getto di calcestruzzo liquido (g = 25 x 10^{-6} N/mm^3) che grava su un elemento estruso (considerando anche il peso dei ferri), ed è dato dal peso della cappa di spessore 40 mm più il peso di un travetto (risultante di un semitravetto sinistro più un semitravetto destro) di sezione trapezoidale (base minore 80 mm, base maggiore 190 mm e altezza 200 mm), dunque:

$$\text{peso cappa} = 40 \cdot 390 \cdot 25 \cdot 10^{-6} = 0.39 \text{ N/mm}$$
$$\text{peso travetto} = \left(\frac{80+190}{2}\right) \cdot 200 \cdot 25 \cdot 10^{-6} = 0.68 \text{ N/mm}$$

$$p = 1.1 \text{ N/mm}$$

In base all'equazione (5.3), tenuto conto che il modulo elastico a flessione (E) del polivinilcloruro (PVC) rigido riciclato è circa uguale a quello del materiale vergine (3300 N/mm^2) e che il modulo di scorrimento a 28 giorni si riduce a circa 3000 N/mm^2 (Par. 2.3.2, Tab. 9), la lunghezza massima dell'elemento, in funzione della freccia ammissibile, è:

$$l = 2500 \text{ mm}$$

Per calcolare gli sforzi nella trave inflessa, occorre calcolare il momento flettente come:

$$M = \frac{p \cdot l^2}{8} \qquad (5.5)$$

dove:
M (kN x mm) è il momento flettente;
p (N/mm) è il carico distribuito;
l (mm) è la lunghezza della trave.
Quindi, in una trave di lunghezza 2500 mm il momento flettente è:

$$M = 859 \text{ kN/mm};$$

e la sollecitazione di trazione (s) nel materiale in mezzeria della trave inflessa, secondo la formula (5.4), è:

$$s = 2.7 \text{ N/mm}^2.$$

Il Decreto Ministeriale del 14 Febbraio 1992 "*Norme tecniche per l'esecuzione delle opere in cemento armato normale e precompresso e per le strutture metalliche*" (Parte Prima, punto 7.1.3.2) prevede che, in assenza di cassero inferiore durante la fase di armatura e di getto, i blocchi resistano a un carico concentrato, applicato nel centro della faccia superiore, pari a 1.5 kN. Il momento flettente, derivante dall'applicazione di un carico concentrato, si calcola come:

$$M = \frac{P \cdot l}{4} \qquad (5.6)$$

dove:
M (kN x mm) è il momento flettente;
P (KN) è il carico concentrato;
l (mm) è la lunghezza della trave.
Quindi, in una trave di lunghezza 2500 mm il momento flettente è:

$$M = 937 \text{ kN/mm};$$

e la sollecitazione di trazione (s) nel materiale in mezzeria della trave inflessa, secondo la formula (5.4), è:

$$s = 2.9 \text{ N/mm}^2.$$

In conclusione, le sollecitazioni totali calcolate (5.6 N/mm^2) sono di molto inferiori alla resistenza a flessione del polivinilcloruro (PVC), con un fattore di sicurezza 12 per l'elemento estruso di lunghezza 2500 mm che, in base alla freccia ammissibile, è la lunghezza massima dell'elemento in funzione autoportante.
Per quanto concerne la resistenza del giunto inferiore durante il getto è possibile schematizzare il giunto come costituito da due mensole affiancate di lunghezza 40 mm, vincolate con un incastro alla parete del componente: sulle mensole agisce un carico uniformemente distribuito che corrisponde alla pressione della colonna di calcestruzzo liquido sovrastante. Questo schema, da un punto di vista strutturale, è quello che determina le condizioni più drastiche e, quindi, ai fini di una verifica di sicurezza, è preferibile a quello della trave incastrata di lunghezza 80 mm: si possono verificare la freccia (f) all'estremità libera e le sollecitazioni dovute alla flessione (s), calcolate all'incastro.

La freccia all'estremità libera della mensola si calcola secondo la formula:

$$f = \frac{1}{8} \cdot \frac{p \cdot l^4}{E \cdot J} \qquad (5.7)$$

dove:
f (mm) è la freccia;
p (N/mm) è il carico distribuito agente sulla mensola;
l (mm) è la lunghezza della mensola;
E (N/mm^2) è il modulo elastico del polivinilcloruro (PVC) rigido riciclato;
J (mm^4) è il momento d'inerzia della sezione rettangolare della mensola.
Gli sforzi nella mensola inflessa si calcolano secondo la formula:

$$\sigma = \frac{M}{W} \qquad (5.8)$$

dove:
s (N/mm^2) è lo sforzo;
M (kN x mm) è il momento flettente agente sulla mensola;
W (mm^3) è il momento resistente della sezione rettangolare della mensola, pari a $bh^2/6$.
Per applicare le formule (5.7) e (5.8) occorre calcolare il momento d'inerzia della sezione rettangolare della mensola (altezza 5 mm, base 1 mm), che è:

$$J = 2.25 \text{ mm}^4$$

Il carico uniformemente distribuito, che agisce sulla mensola, corrisponde alla pressione esercitata dalla colonna di calcestruzzo liquido (g = 25 x 10^{-6} N/mm^3) alta 240 mm e di spessore unitario (1 mm), dunque:

$$p = \gamma \cdot h \cdot 1 = 6 \cdot 10^{-3} \text{ N/mm}$$

Per calcolare gli sforzi nella mensola inflessa, occorre calcolare il momento flettente come:

$$M = \frac{p \cdot l^2}{2} \qquad (5.9)$$

dove:
M (kN x mm) è il momento flettente;
p (N/mm) è il carico distribuito;
l (mm) è la lunghezza della mensola.
Quindi, nella mensola lunga 40 mm il momento flettente all'incastro è:

$$M = 4.8\ N/mm;$$

e la sollecitazione di trazione (s) nel materiale, secondo l'equazione (5.9), è:

$$s = 3.2\ N/mm^2.$$

La freccia all'estremità libera della trave, secondo l'equazione (5.8), è:

$$f = 0.28\ mm$$

Dunque, si può affermare che le sollecitazioni nel materiale all'attacco del giunto inferiore con la parete dell'elemento estruso sono più che accettabili e la freccia è tale da non provocare l'apertura del giunto stesso durante il getto del calcestruzzo.
Un ultima considerazione va fatta sulla differenza di coefficiente di dilatazione termica tra calcestruzzo (a = 10×10^{-6} °C^{-1}) e polivinilcloruro (a = 70×10^{-6} °C^{-1}): in effetti, si tratta di una differenza notevole che può generare, per le variazioni termiche d'esercizio, uno stato di sforzo nella struttura; le due strutture, quella in calcestruzzo e l'elemento in polivinilcloruro (PVC), hanno, però, una fortissima differenza di rigidezza, tale da poter considerare trascurabili questi sforzi.

5.2 Sistema di elementi estrusi in plastica eterogenea per tramezze mobili

Nelle materie plastiche di riciclo eterogenee i processi degradativi fotoossidativi sono particolarmente severi, per la presenza di una elevata frazione di polietileni (circa il 65%) (Par. 3.3.1): per questo motivo è opportuno prevedere per questi materiali applicazioni al riparo dall'esposizione diretta alla luce solare. In tal senso si è pensato di impiegare le plastiche eterogenee per un sistema di elementi, ottenuti per estrusione in modo da poter disporre di

lunghezze variabili, utilizzabili per realizzare tramezze mobili per interni.
Il sistema è costituito da un profilo base (Tav. 36), di lunghezza 230 mm e spessore 10 mm, che viene assemblato, mediante un profilo di connessione (Tav. 37), di lunghezza 140 mm, con altri profili simili, fino a ottenere la lunghezza di parete desiderata: il meccanismo che permette l'assemblaggio delle doghe è costituito da due giunti elastici a scatto (Tav. 38 e Tav. 38 bis) che vengono incastrati attraverso un movimento di rotazione (Tav. 39).
La tramezza così ottenuta viene ancorata al pavimento per mezzo di un profilo ad U che funziona da guida: il profilo viene fissato con viti adatte al pavimento e successivamente viene alloggiata la parete (Tav. 40). Invece, per fissare la tramezza al plafone e alle murature perimetrali si utilizzano dei profili a L: il profilo viene ancorato con viti adatte e, dopo averla accostata al profilo, si blocca la parete con un coprifilo (Tav. 39 e Tav. 40); il coprifilo si aggancia al profilo a L per mezzo di un giunto elastico (Tav. 41 e Tav. 41 bis).
Sia il profilo a U che quello a L e il coprifilo sono sempre profili estrusi in plastica eterogenea. Per mezzo di un profilo di connessione a T è possibile, inoltre, realizzare tramezze d'angolo (Tav. 42).

5.2.1 L'isolamento acustico

Nelle tramezze divisorie il requisito dell'isolamento acustico è molto importante: essendo, infatti, il potere fonoisolante funzione della massa, nel caso di materiali molto leggeri come le materie plastiche, l'isolamento acustico diventa un problema di difficile soluzione, a meno di ricorrere all'interposizione di materiali isolanti espansi all'interno del tramezzo oppure tra due tramezzi affiancati, oppure, ancora, creando delle cavità risuonatrici per mezzo di fori nel pannello.
Nel caso specifico del sistema per tramezze mobili ottenuto con plastiche eterogenee è possibile effettuare un calcolo teorico del potere fonoisolante, tenendo conto della frequenza del suono e della massa dell'unità di superficie della parete, secondo quanto stabilito dalla norma UNI/EDL 8075. Se le onde sonore incidono la parete in direzione normale, vale la seguente relazione (Romanelli, 1987, p. 123):

$$R_o = 10 \log_{10} \cdot \left[1 + \left(\frac{\pi \cdot f \cdot M}{\rho_C} \right) \right] \qquad (5.10)$$

dove:
R_o (dB) è il potere fonoisolante della parete;
f (Hz) è la frequenza del suono;
M (N/m^2) è la massa dell'unità di superficie della parete;
r_C (N/m^2) è l'impedenza caratteristica dell'aria, pari a 4100 N/m^2.
Nel caso le onde sonore siano perfettamente diffuse, vale la seguente relazione (Romanelli, 1987, p. 124):

$$R_d = R_o - 10 \log_{10} \left(0.23 R_o \right) \qquad (5.11)$$

dove:
R_d (dB) è il potere fonoisolante della parete.
Calcolando, secondo le equazioni (5.10) e (5.11), il potere fonoisolante di una tramezza, per frequenze del suono da 125 Hz a 4000 Hz, e diagrammando i valori ottenuti in funzione delle frequenze, si ottiene una curva che viene confrontata con una curva limite, fissata dalla normativa (Circolare Ministero LL.PP. n. 1769 del 30 Aprile 1966): translando la curva limite, parallelamente a se stessa, fino a quando la somma degli scarti dei punti calcolati teoricamente al di sotto della curva stessa è inferiore a 12 dB e lo scarto massimo, per una frequenza qualsiasi, non supera i 5 dB, si può ottenere l'indice di valutazione del potere fonoisolante (R_W), riferito alla frequenza di 500 Hz (Romanelli, 1987, p. 125). Nel caso della parete ottenuta assemblando i profili estrusi in plastica eterogenea, supponendo di utilizzare come miscela una tra quelle usualmente prodotte, il Replex della R.P.E. di Parma (R.P.E., 1996), di densità pari a 13000 N/m^3, si ottiene una massa dell'unità di superficie pari a 70 N/m^2, di molto inferiore a quella di una tramezza di uguale spessore, composta da laterizi forati e due strati di intonaco, che è pari a 1400 N/m^2. Di fatto, l'indice di valutazione del potere fonoisolante per i due tipi di tramezze risulta:

tramezzo in plastica R_W = 26 dB
tramezzo in muratura R_W = 42 dB

5.3 Pannello di tamponamento esterno in polifenilossido (PPO) riciclato

Il polifenilossido (PPO) riciclato (nome commerciale: serie Noryl della GE Plastics) è un tecnopolimero che presenta un'elevata resistenza agli agenti atmosferici, all'umidità e alla luce, quindi utilizzabile per applicazioni per esterni (Par. 3.4.6) e in particolare, nel caso specifico, per il rivestimento di facciate di edifici.
Il sistema è costituito da un pannello stampato a nervature incrociate (Tav. 43 e Tav. 46), pannello di dimensioni 1300 mm per 3050 mm , analoghe a quelle di un pannello di tamponamento esterno della serie MEG - Abet Laminati (Abet Laminati, 1992): la lavorazione per stampaggio è stata scelta in quanto permette di disegnare lo stampo in modo da "testurizzare" la superficie del pannello, nel caso si voglia realizzare un particolare effetto estetico, o anche per limitare eventuali deformazioni che il risucchio delle nervature potrebbe provocare sulla superficie esterna del pannello.
Il pannello viene assemblato tramite due giunti a incastro elastico, un giunto a trave rastremata e un giunto sferico, giunti che si inseriscono in un profilo di connessione estruso (Tav. 44) che presenta una zona per l'alloggiamento del giunto sferico e una zona per l'alloggiamento del giunto rastremato; questi profili sono supportati da staffe in acciaio ancorate alla muratura (Tav. 44 bis): a causa dell'elevato coefficiente di dilatazione termica del polimero utilizzato, è prevista una zona, all'interno del profilo di connessione, per assorbire la dilatazione del pannello.
Inoltre, non essendo possibile definire il numero esatto dei pannelli necessari per rivestire la facciata di un edificio qualsiasi, si è realizzato un profilo terminale di connessione (Tav. 45), nel quale si va a inserire il pannello, tagliato a misura, che chiude la parete (Tav. 46); su questo profilo si innesta, sfruttando i medesimi concetti di assemblaggio, l'elemento d'angolo (Tav. 47).
L'elemento angolare, opportunamente tagliato, viene utilizzato anche come finitura verticale delle aperture (Tav. 48), tramite un profilo guida fissato al serramento (Tav. 48 bis): per la finitura orizzontale è possibile, invece, utilizzare una cartella sagomata in lamiera d'acciaio preverniciata (Tav.49).
Infine, per il giunto orizzontale dei pannelli sono proposte due soluzioni, entrambe in grado di assorbirne la dilatazione termica:

- un coprigiunto strutturale in neoprene inserito a pressione tra due alette sagomate sulla parte inferiore e superiore del pannello (Tav. 50);

- un collegamento maschio - femmina, con una guarnizione in neoprene inserita a pressione in una guida sagomata sul lato superiore del pannello (Tav. 51).

5.3.1 Dilatazione termica, nervature e giunti

I pannelli di tamponamento esterno degli edifici sono sottoposti a notevoli sbalzi termici: è opportuno, quindi, prevedere adeguati giunti di dilatazione che siano in grado di assorbire le deformazioni legate alla temperatura.
L'allungamento in funzione della variazione di temperatura si calcola secondo l'equazione:

$$\Delta l = \alpha \cdot \Delta T \cdot l \qquad (5.12)$$

dove:
Δl (mm) è la variazione di lunghezza del pannello;
a (°C^{-1}) è il coefficiente di dilatazione termica del materiale;
ΔT (°C) è la variazione di temperatura;
l (mm) è la lunghezza del pannello.
Considerando una variazione di temperatura di 50 °C, con un coefficiente di dilatazione termica, per il polifenilossido (PPO), a = 60 x 10^{-6} °C^{-1} (GE Plastics, 1989, p.8), si ottiene, secondo l'equazione (5.12):

$$\Delta l \text{ verticale} = 9 \text{ mm}$$
$$\Delta l \text{ orizzontale} = 4 \text{ mm}$$

Per quanto concerne, invece, il calcolo delle nervature torna utile il diagramma triassiale (Fig. 84) che descrive la relazione dimensionale tra una piastra piana a sezione rettangolare e una piastra a nervature incrociate aventi il medesimo momento d'inerzia (Tav. 7): come momento d'inerzia di riferimento si considera quello della sezione rettangolare del pannello Abet, di spessore 10 mm.
Eguagliando i momenti d'inerzia del pannello di riferimento e di quello stampato in tecnopolimero, considerando la medesima base, pari a 1300 mm, si ottiene la relazione:

$$E_A \cdot h_A^3 = E_N \cdot h_N^3 \qquad (5.13)$$

dove:

E_A (N/mm²) è il modulo elastico a flessione del laminato costituente il pannello di riferimento;
E_N (N/mm²) è il modulo elastico a flessione del polifenilossido (PPO) riciclato;
h_A (mm) è lo spessore del pannello di riferimento;
h_N (mm) è lo spessore equivalente del pannello in tecnopolimero.
Considerando che E_A è uguale a 13000 N/mm² (Abet Laminati, 1992, p. 9) e che E_N è uguale a 2500 N/mm² (GE Plastics, 1989, p. 8) si ottiene dall'equazione (5.13) uno spessore equivalente del pannello in tecnopolimero pari a:

$$h_N = 17 \text{ mm}$$

Utilizzando il diagramma triassiale (Fig. 84), in base al procedimento riportato nell'esempio di calcolo 2 (Par. 4.2.2.1), per uno spessore della piastra piana (t_A) di 17 mm e uno spessore della parete nominale della piastra nervata (t_B) di 5 mm, si ricava l'altezza della nervatura (T) pari a:

$$T = 38 \text{ mm}$$

e un passo delle nervature pari a:

$$N = 0.0065 \text{ nervature/millimetro}$$

che corrisponde a una nervatura ogni 150 mm. Nel disegno del componente si è voluto, però, contenere l'altezza della nervatura a 30 mm, diminuendone il passo a 100 mm (N = 0.01): per N = 0.01 si ottiene un rapporto $(t_A \times N)/W = 0.17$ e, in base al diagramma triassiale, un rapporto $T/t_A = 1.70$ e un rapporto $t_B/t_A = 0.53$, che corrispondono a uno spessore della piastra piana (t_A) di 17.6 mm (uguale al valore minimo necessario) e a un spessore della parete nominale della piastra nervata (t_B) di 9.3 mm (superiore al valore di progetto, dunque verificato).
Le nervature così dimensionate non rispettano i parametri necessari a limitare i fenomeni di risucchio sulla parete esterna del pannello (Tav. 5): questo impone di prevedere, nella realizzazione del pannello, un disegno ("texture") sulla superficie del componente che mascheri opportunamente eventuali deformazioni, disegno che, essendo legato a situazioni estetiche relative ai gusti del progettista, del committente e del cliente, esula dagli scopi di questa tesi e, dunque, non viene affrontato.

Per quanto concerne, infine, il calcolo dei giunti a incastro elastico (Par. 4.2.8), nel caso del giunto a trave rastremata la lunghezza del giunto si calcola in base alla freccia (dente del giunto) e al rapporto tra l'altezza della sezione all'estremità libera (h_l) e l'altezza della sezione all'attacco con la parete nominale del componente (h) (Tav. 20), mentre nel caso del giunto sferico vanno rispettate le proporzioni corrette tra il diametro esterno dell'attacco (D), il diametro esterno dello spinotto (d) e il dente dell'incastro (e) (Tav. 22 e Tab. 17).
Per il giunto a sezione rastremata, con f = 10 mm, h = 10 mm e h_l = 5 mm, si ottiene una valore di K pari a 1.635 (Fig. 91); ipotizzando la deformazione del 5 %, secondo l'equazione (4.14) si ricava la lunghezza del giunto pari a:

$$l = 42 \text{ mm}$$

Per il giunto sferico le proporzioni considerate sono relative a un diametro esterno dello spinotto d = 14 mm (Tab. 17).

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

(N.B. La numerazione delle date tiene conto anche dei testi contenuti nella bibliografia ragionata).

Calogero Guido,
(1937), voce 'Tecnica', in *Enciclopedia Italiana*, Istituto della Enciclopedia italiana Treccani, Roma, vol. XXXIII, p. 378.

Heidegger Martin,
(1950), *Der Ursprung des Kunstwerkes*, in Martin Heidegger, *Holzwegl*, Klostermann, Frankfurt am Main, 1950, (tr. it. di Pietro Chiodi, *L'origine dell'opera d'arte*, in Martin Heidegger, *Sentieri interrotti*, La Nuova Italia, Firenze, 1968).

Wright L. Frank,
(1957), *A testament*, Horizon Press Inc., New York (tr. it., Einaudi, Torino, 1963).

Singer Charles, et alii,
(1961), *Storia della tecnologia*, vol.3, Boringhieri, Torino.

Adorno Theodor Wiesengrund,
(1965), 'Funzionalismo oggi', relazione al congresso del Deutsche Werkbund, Berlino, 23 ott., pubblicata in *Ohne Leitbild. Parva Aesthetica*, Suhrkamp Verlag, Frankfurt, 1967 (tr. it., *Parva Aesthetica. Saggi 1958-1967*, Feltrinelli, Milano, 1979, pp. 103-127).

Kubach Hans Erich,
(1972), *Architettura romanica*, Electa, Milano.

Meadows D. H., et alii,
(1972), *The Limit to Growth*, The Club of Rome, Ginevra, (tr. it., *I limiti dello sviluppo*, Mondadori, Milano, 1972.).

Bucaille Richard, Pesez Jean-Marie,
(1978), voce 'Cultura materiale', in *Enciclopedia*, vol. 4, Einaudi, Torino, pp. 271-305.

Leach Edmund,
(1978), voce 'Cultura/Culture', in *Enciclopedia*, vol. 4, Einaudi, Torino, pp. 238-270.

Gratton Livio,
(1979), voce 'Materia', in *Enciclopedia*, vol. 8, Einaudi, Torino, pp. 878-929.

Hoechst Italia S.p.A.,
(1979[1]), *Materie plastiche per uso tecnico. Basi di calcolo, dati caratteristici, esempi di calcolo*, manuale tecnico, Milano.

Norberg-Schulz Christian,
(1979), *Genius loci*, Electa, Milano.
Wyrobisz Andrzej,
(1979), voce 'Materiali', in *Enciclopedia*, vol. 8, Einaudi, Torino, pp. 930-960.
Beck D. Ronald,
(1980), *Plastic Product Design*, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 2ª ed.
Bertacchi Giorgio,
(1980), *Tecnoplastici. Fondamenti di calcolo per manufatti stampati. Introduzione al calcolo*, Metalmeccanica Plast, Milano.
IUCN*,
(1980), *World Conservation Strategy*, Gland, Switzerland.
*International Union for the Conservation of Nature and Natural Resources
Cresswell Robert,
(1981), voce 'Tecnica', in *Enciclopedia*, vol. 13, Einaudi, Torino, pp. 971-994.
Formaggio Dino,
(1981), 'L'arte, il lavoro, le tecniche', in Mikel Dufrenne, Dino Formaggio, Trattato di estetica, 2 voll., Mondadori, Milano, pp. 101-145.
Lesourne Jacques,
(1981), *Le milles sentiers de l'avenir*, Seghers, Paris, (tr. it. *Domani anno 2000*, Edizioni del Sole 24ore, Milano, 1985).
Prigogine Ilya, Stengers Isabelle,
(1981), voce 'Vincolo', in *Enciclopedia*, vol. 14, Einaudi, Torino, pp. 1064-1080.
Powell C. Peter,
(1983), *Engineering with Polymers*, Chapman and Hall, London.
Bairati Eleonora, Finocchi Anna,
(1984), *arte in Italia. Lineamenti di storia e materiali di studio*, Loescher, Torino, vol. 1°.
Hoechst Italia S.p.A.,
(1986), *Materie plastiche per uso tecnico. Progettazione di manufatti con materie plastiche tecniche*, manuale tecnico, Milano.
Manzini Ezio,
(1986), *La materia dell'invenzione*, Arcadia Edizioni, Milano.
Nardi Guido,
(1986), *Le nuove radici antiche. Saggio sulla questione delle tecniche esecutive in architettura*, Angeli, Milano.

Oberbach K., Muller W.,
(1987), *Prove su manufatti in materiale plastico*, Tecniche Nuove, Milano.
Pawley Martin,
(1987), "Technology Transfer", *Architectural Review*, n. 1087, set., pp. 31-39.
Romanelli Francesco,
(1987), Tramezzi in plastica, Liguori Editore, Napoli.
Wetzel J. P.,
(1987), "Waste Management and Plastics Recycling. A Status Report", *Swiss Plastics*, n. 1-2, set., pp. 7-16.
Binetti Giovanni, et alii,
(1988), *300 idee di nuovi materiali*, Edizioni del Sole 24 Ore, Milano.
Cortellazzo Manlio, Zolli Paolo,
(1988), *Dizionario etimologico della lingua italiana*, Zanichelli, Bologna.
Cognard Philippe,
(1989), Les applications industrielles des matériaux composites, Editions du Moniteur, Paris, 2 voll.
Nardi Guido,
(1988), *Genius artis e genius materialis*, in Marisa Bertoldini (a cura di), *La casa tra tecniche e sogno. La costruzione della propria*
casa in un esame transdisciplinare, Angeli, Milano, pp. 127-144.
GE Plastics,
(1989[1]), *Guida alla progettazione funzionale ed economica*, manuale tecnico, Cinisello Balsamo (MI).
GE Plastics,
(1989[2]), *The New Engineering*, manuale tecnico, Cinisello Balsamo (MI).
Mangiarotti Anna,
(1989), *Gli elementi tecnici del progetto. Trasformazioni e possibilità espressive della materia in architettura*, Angeli, Milano.
Molinari Claudio (a cura di),
(1989), *Manutenzione in edilizia. Nozioni, problemi, prospettive*, Angeli, Milano.
AA.VV.,
(1990), "Plastics in Construction: Finding New Niches", *Journal of Light Construction*, lug., pp. 7-11.

Basf,
(1990), *Styropor. Utilizzazione/Smaltimento*, Informazione tecnica, Milano.
Dupont,
(1990), *Design Handbook*, manuale tecnico, Cologno Monzese (MI).
GE Plastics,
(1990[1]), *Tecnopolimeri*, documentazione tecnica, Cinisello Balsamo (MI).
GE Plastics,
(1990[2]), *Lastre Lexan per vetrature di sicurezza*, manuale tecnico, Cinisello Balsamo (MI).
Hellerich Walter, Harsch Gunther, Haenle Siegfried,
(1990), *Prontuario delle materie plastiche*, Tecniche Nuove, Milano, 3ª ed.
Manzini Ezio,
(1990[1]), *"Chiudere il cerchio", le intenzioni del convegno*, relazione
introduttiva a nome del Comitato promotore del convegno "Chiudere il cerchio. Progetto, prodotto, ambiente.", Politecnico di Milano, Facoltà di Architettura, feb. 1990.
Molinari Claudio,
(1990), *Il caso dei componenti edilizi*, relazione al convegno "Chiudere il cerchio. Progetto, prodotto, ambiente.", Politecnico di Milano, Facoltà di Architettura, feb. 1990.
Nardi Guido,
(1990), *Perché "chiudere il cerchio"*, introduzione al convegno "Chiudere il cerchio. Progetto, prodotto, ambiente.", Politecnico di Milano, Facoltà di Architettura, feb. 1990.
AIPE*,
(1991[1]), *L'AIPOR e la normativa sulla prevenzione incendi*, documentazione tecnica, Milano.
*Associazione Italiana Polistirolo Espanso
Bertoldini Marisa,
(1991), *Progettare l'abitare: le basi per l'indagine*, in Marisa Bertoldini (a cura di), *L'atto progettuale. Strutture e percorsi*, 1991, CittàStudi, Milano, pp.11-24.
Campioli Andrea,
(1991), La critica della poetica e dello stile, in Guido Nardi, Andrea Campioli, Anna Mangiarotti, *Frammenti di coscienza tecnica. Tecniche esecutive e cultura del costruire*, Angeli, 1991, Milano, pp. 31-62.

EVC*,
(1991), *Riciclo del PVC. Meno rifiuti, maggior utilità*, documentazione tecnica, Assago (MI).
*European Vinyls Corporation
Gordon E. James,
(1991), *Strutture sotto sforzo*, Zanichelli, Bologna.
Mangiarotti Anna,
(1991), *L'innovazione nel progetto. Esempi di architettura contemporanea*, Angeli, Milano.
Nardi Guido,
(1991), *Gli elementi costitutivi del progetto: genealogia degli archetipi del costruire*, in Guido Nardi, Andrea Campioli, Anna Mangiarotti, *Frammenti di coscienza tecnica.Tecniche esecutive e cultura del costruire*, Angeli, 1991, Milano, pp. 13-29.
Sinopoli Nicola,
(1991), "L'innovazione tecnica nelle costruzioni", Sinopie, n. 6, mar. pp. 10-16.
Abet Laminati,
(1992), *MEG, material exterior grade*, documentazione tecnica, Cinisello Balsamo (MI).
APME,
(1992), *Recycling in Action*, Federchimica, Milano.
*Associazione dei produttori di materie plastiche in Europa
Brambilla Marco, Gargantini Mario,
(1992), *I rifiuti solidi urbani e la raccolta differenziata*, AMSA, Milano.
CIBA-GEIGY Divisione Additivi,
(1992), *Gestione dei rifiuti di materie plastiche*, Bologna.
Ciribini Giuseppe,
(1992), *Cultura tecnologica ed epistemologia del progetto*, in Virginia Gangemi (a cura di), *Cultura e impegno progettuale. Orientamenti e strategie oltre gli anni '90*, Angeli, Milano, 1992, pp. 53-61.
Lundhvist Thomas,
(1992), *L'estensione della responsabilità del produttore*, relazione al convegno "fare*dis*fare. Lo scenario del produttore riproduttore", Politecnico di Milano, 23-24 ott. 1994.
Maura Giancarlo,
(1992), *Materiali per l'edilizia. Schede tecniche*, Edizioni DEI, Roma, 2 ed.
Morfini Luisa,
(1992), "Dolce casa inquinata...", *Modulo*, n. 185, ott., pp. 1052 -1058.

Paiella Maria Luisa,
(1992-93), Tesi di Laurea, *La valutazione dei prodotti da costruzione attraverso il sistema di etichettatura ecologica*,
relatore
Silvia Piardi, correlatore Andrea Ratti, Politecnico di Milano, Facoltà di Architettura.
Rao S. Natti,
(1992), *Materie plastiche. Le formule*, Tecniche Nuove, Milano.
Rubin S. Edward, et alii,
(1992), "Realistic Mitigation Options for Global Warming",
Science,
n.257, lug., pp.148-149 e pp. 261-267.
Simonelli Giuliano,
(1992), "E per vestito un guscio di plastica", *Modulo*, n. 179, gen. pp. 190-196.
APME*,
(1993), *Plastica - Ottimizzazione delle risorse*, Federchimica, Milano.
*Associazione dei produttori di materie plastiche in Europa
APME*, PWMI**,
(1993), *Valutare il bilancio ambientale*, Federchimica, Milano.
*Associazione dei produttori di materie plastiche in Europa
**Centro Europeo per le plastiche nell'ambiente
Associazione Nazionale Serramenti PVC,
(1993), *I serramenti esterni in PVC. Requisiti e prestazioni*, documentazione tecnica, Milano.
BCSD*,
(1993), *Eco-efficency Workshop*, ciclostilato, nov. 1993.
*Business Council for Sustainable Development
Campioli Andrea,
(1993), *Il contesto del progetto*, Angeli, Milano.
Dupont,
(1993), *Reactive Polymers. For Improved compatibility and Stability During Recycling Operations*, documentazione tecnica, Cologno Monzese (MI).
Fiocca Alberto,
(1993), *Riciclo*, relazione al convegno "TMP", Saronno, 7 ott. 1993.
GE Plastics,
(1993[1]), *Productive Recycling of Engineering Thermoplastics*, documentazione tecnica, Cinisello Balsamo (MI).

GE Plastics,
(1993[2]), *Architetture trasparenti*, brochure illustrativa, Cinisello Balsamo (MI).
Kurtz Karl-Rudolph,
(1993), "Riciclaggio dei materiali: possibilità e limiti", *Plastics*, gen.-feb., pp. 66-73.
Mills J. Nigel,
(1993), *Plastics. Microstructure & Engineering Applications*, Edward Arnold, Londra, 2ª ed.
Morfini Luisa,
(1993[1]), "Case riciclate", *Modulo*, n. 195, ott., pp. 934-938.
Morfini Luisa,
(1993[2]), "Nascita, ascesa e morte di un prodotto", *Modulo*, n. 190, apr., pp. 300-304.
Nardi Guido,
(1993), *Prefazione*, in Andrea Campioli, *Il contesto del progetto*, Angeli, Milano, pp. 7-11.
Nironi Laura,
(1993-94), Tesi di laurea, *L'analisi del ciclo di vita e le tecnologie edilizie. Uno strumento di supporto alle scelte di progetto sui materiali e sul loro assemblaggio*, relatore Guido Nardi, correlatori Claudio Cerruti e Luisa Morfini, Politecnico di Milano, Facoltà di Architettura.
Perrault Dominique,
(1993), *L'innovazione tecnica in architettura attraverso la lettura di alcuni progetti*, conferenza tenuta il 29 gen., presso il Politecnico di Milano, Facoltà di Architettura, in Monica Zappelli (a cura di), *Seminari di Cultura Tecnologica della Progettazione*, 1993, CittàStudi, Milano, pp. 121-164.
Rigamonti Ennio,
(1993), "Riciclo di componenti edilizi: un quadro d'insieme", *Modulo*, n. 195, ott., pp. 935-938.
Saechtling Hansjurgen,
(1993), *Manuale delle materie plastiche*, Tecniche Nuove, Milano, 6ª ed.
AA.VV.,
(1994[1]), "Sempre a proposito di EPS", *Macplas*, n. 163, dic., pp. 39-40.
Abraham M. Dulcy, et alii,
(1994), *Recycling of Destructed Building Products*, relazione al convegno "Sustainable Construction", Tampa (Florida, USA), 6-9 nov. 1994.

APME,
(1994), *Il ruolo dell'EPS*, Federchimica, Milano.
*Associazione dei produttori di materie plastiche in Europa
Baglioni Adriana, et alii,
(1994), *The Scrap Tires as Building Material*, relazione al convegno "Sustainable Construction", Tampa (Florida, USA), 6-9 nov. 1994.
Bayer,
(1994), *Recycling of Engineering Thermoplastics - Case Studies*, documentazione tecnica, Milano
Beretta Claudia Anna,
(1994), *Ipotesi normative per le materie plastiche riciclate*, relazione al convegno AIM "Sviluppi e tendenze del riciclo di materie plastiche", Milano 3 mag. 1994.
Bressi Giorgio,
(1994), *Recycling of Construction & Demolition Waste: the Italian Technology*, relazione al convegno "Sustainable Construction", Tampa (Florida, USA), 6-9 nov. 1994.
Camino Giovanni,
(1994), *Effetto della contaminazione dei materiali polimerici sul riciclo*, relazione al convegno AIM "Sviluppi e tendenze del riciclo di materie plastiche", Milano 3 mag. 1994.
Campioli Andrea,
(1994), *La struttura e l'organizzazione del progetto negli interventi edilizi complessi: gli specialismi, le fasi, gli operatori*, in Claudio Molinari e Andrea Campioli (a cura di), *Formazione per il progetto. Progetto per la formazione. Metodi, tecniche e nuovi operatori per una gestione innovativa dell'attività progettuale*, Angeli, Milano, 1994, pp. 29-44.
Ciba Geigy,
(1994), *Recyclostab. New Life for Plastics*, documentazione tecnica, Origgio (MI).
De Groote P., Godard P.,
(1994), *Mixed Plastics Compatibilization*, APME, Technical and Environmental Centre, Bruxelles.
De Pauw Carlo, et alii,
(1994), *Reuse of Demolition Waste as Aggregates in Concrete. A New Challenge or the Re-Introduction of Old Practise?*, relazione al convegno "Sustainable Construction", Tampa (Florida, USA), 6-9 nov. 1994.

Fabiani Riccardo,
(1994), *Il polistirene: profilo informativo*, relazione al convegno "Riciclare '94. Il Polistirene", Assorimap, Milano.
Flynn L. Auchey,
(1994), *The Use of Recycled High Density Polyethylene Fibers as Secondary Reinforcement in Portland Cement Concrete*, relazione al convegno "Sustainable Construction", Tampa (Florida, USA), 6-9 nov. 1994.
Frank E. Robert,
(1994), *Construction and Demolition Wood Waste Used in Wood Cement Composites*, relazione al convegno "Sustainable Construction", Tampa (Florida, USA), 6-9 nov. 1994.
Fregola Mario, et alii,
(1994), "Recupero funzionale dei tecnopolimeri: esempi applicativi", *Plast*, feb., pp. 103-109.
GE Plastics,
(1994), *Guida ai principi di progettazione con i tecnopolimeri*, manuale tecnico, Cinisello Balsamo (MI).
Golinelli Clara,
(1994), *Macchine per abitare nel 2000*, in AA.VV., *Housing 6*, Etas Libri, Milano, 1994, pp. 2-5.
Hamassaki T. Luiz, Sbrighi Neto Claudio,
(1994), *Technical and Economic Aspects of Construction/Demolition Waste Utilization*, relazione al convegno "Sustainable Construction", Tampa (Florida, USA), 6-9 nov. 1994.
Hansen H. Kim,
(1994), *Understanding Ecological Changes in the Danish Building Tradition*, relazione al convegno "Sustainable Construction", Tampa (Florida, USA), 6-9 nov. 1994.
Heino Erja,
(1994), *Recycling of Construction Waste*, relazione al convegno stainable Construction", Tampa (Florida, USA), 6-9 nov. 1994.
Hill C. Richard, Bergman G. Jan, Bowen A. Paul,
(1994), *A Framework for the Attainment of Sustanaible Construction*, relazione al convegno "Sustainable Construction", Tampa (Florida, USA), 6-9 nov. 1994.
ICI Polyurethanes,
(1994), *Polyurethanes Recycling and Waste Managemen*t, documentazione tecnica, Ternate (VA).
Jagerschimdt M. C.,
(1994), "Fuci: un project en bétor puor les plastiques", *Caoutchoucs et Plastiques*, n. 730, mar., pp. 32-34.

Kibert J. Charles,
(1994[1]), *Establishing Principles and a Model for Sustainable Construction*, relazione al convegno "Sustainable Construction", Tampa (Florida, USA), 6-9 nov. 1994.
Liebold R.,
(1994), "Recycling von Formteilen aus Faserverbund-werkstoffen",
Kunststoffberater, n.12, dic., pp. 28-33 (tr. it. Sabino Leghissa, "Il riciclo di manufatti in compositi", *Seleplast*, n. 4, apr., 1995, pp. 44-47).
Mariani Giorgio,
(1994), "Le materie plastiche nel settore dell'edilizia", *Interplastics*, n.6, nov. - dic., pp. 64-70.
Maydl Peter,
(1994), *Possibilities of Reusing Construction Waste. A Feasibility -Study for the City of Vienna 1993*, relazione al convegno "Sustainable Construction", Tampa (Florida, USA), 6-9 nov. 1994.
Piardi Silvia, et alii,
(1994), *Recycled Polymers - Suggestions for their Applications: Sound Attenuation Biowalls*, relazione al convegno "Sustainable Construction", Tampa (Florida, USA), 6-9 nov. 1994.
Pilati Francesco,
(1994), *Analisi critica delle tecnologie di riciclo: un esempio, il PET*, relazione al convegno AIM "Sviluppi e tendenze del riciclo di materie plastiche", Milano 3 mag. 1994.
Pinetti Lucio,
(1994[1]), *Legislazione e quadro economico del riciclo di polimeri in Europa*, relazione al convegno "Plastics Material Recycling", Palermo 22-24 set. 1994.
Pinetti Lucio (a cura di),
(1994[2]), *Il riciclo di materie plastiche in Italia. Imprese e materiali: verso nuovi equilibri*, Censimento dei riciclatori italiani 1993 a cura della Assorimap, Milano.
Ruch Mark, Rentz Otto,
(1994), *Demolition Waste management Strategies in France and Germany*, relazione al convegno "Sustainable Construction", Tampa (Florida, USA), 6-9 nov. 1994.
Santos P. Carlos,
(1994), *Recycled Cork-board, Expanded Polystyrene and Autoclaved Aerated Concrete. Experimental Research Study as Granular Loose-fill Insulations*, relazione al convegno "Sustainable Construction", Tampa (Florida, USA), 6-9 nov. 1994.

Simona,
(1994), *PVC-Platten und Rohre fur den Bausektor*, documentazione tecnica, Milano.
Steele W. Matthew,
(1994), *Energy-Related Technologies: Five Technologies for Lower Energy Demand and Decreased Air Emissions*, Center for Construction Research and Education, Cambridge.
Tinker A. John,
(1994), *Using Waste Materials as in an Aggregate in Low Thermal Conductivity Mortars*, relazione al convegno "Sustainable Construction", Tampa (Florida, USA), 6-9 nov. 1994.
Truppi Carlo,
(1994), *Continuità e mutamento. Il tempo nell'innovazione delle tecniche e nell'evoluzione dell'architettura*, Angeli, Milano.
Wenguang M., La Mantia F. P.,
(1994[1]), "Riciclo di materiali polimerici eterogenei", *Macplas*, n. 159, lug.-ago., pp. 35-40.
AA.VV.,
(1995[1]), "La Direttiva Prodotti da costruzione", Nuova Finestra, n. 3, mar. pp. 336-348.
AA.VV.,
(1995[2]), "Just what Is the Justification for Recycling?", *British Plastics & Rubber*, n. 2, feb., pp. 4-6.
AA.VV.,
(1995[3]), "Dalla teoria alla pratica. Diventà realtà il riciclo meccanico di serramenti in PVC", *Macplas*, n. 173, nov., pp. 58-61.
AA.VV.,
(1995[4]), "Recycled Tires into Concrete", *Plastics in Building Construction*, n. 7, lug., p. 3.
AA.VV.,
(1995[5]), "Schallschlucker aus dem gelben Sack", *Bauen mit Kunststoffen*, n. 1, gen., pp. 16-18.
AA.VV.,
(1995[6]), "Scarti in pista", *Macplas*, n. 167, apr., p. 45.
AA.VV.,
(1995[7]), "New Processing Technology for Low Cost Plywood Replacement", *Plastics in Building Construction*, n. 7, lug.,pp. 3-4.
AA.VV.,
(1995[8]), "Ecofibre", *Macplas*, n. 174, dic., p. 33.

AA.VV.,
(1995[13]), "Scenari futuri in Europa", *Macplas*, n. 165, feb., pp. 39-41.
AA.VV.,
(1995[14]), "Nouveau procédé de recyclage des matiéres plastiques", *La Constuction*, n. 15-16, apr.
APME*,
(1995[2]), *Plastiche in prospettiva*, Federchimica, Milano.
*Associazione dei produttori di materie plastiche in Europa
APME*,
(1995[4]), *Plastics recovery in Perspective*, Federchimica, Milano.
*Associazione dei produttori di materie plastiche in Europa
Bayer,
(1995[1]), *Bayer all'avanguardia nel riciclaggio delle materie plastiche*, Press Information, ago. 1995, Milano.
Bledzki K. Andrzej, Goracy Krzysztof,
(1995), "Technische Verwertungs-moglichkeiten von vernetzten Kunststoffen", *Kunststoffberater*, n. 5, mag., pp. 33-38.
Butler Kurt, Gruskiewicz Mike,
(1995), "Riciclo di termoindurenti in un mercato competitivo", *Macplas*, n. 173, nov., pp. 127-128.
Callegaro Paolo,
(1995), *Sottocommissione 25 Uniplast: materie plastiche di riciclo*, relazione al convegno "Materie plastiche di riciclo: sviluppi nell'attività di normazione ed evoluzione legislativa", Milano, 5 dic. 1995.
Cattaneo Massimo,
(1995), *Tecnologie di recupero. Tecniche meccaniche e chimiche per il riciclo dei polimeri*, documento interno STP Tecnopolimeri Spa, Ceriano Laghetto (MI).
Celaschi Flaviano,
(1995), *Progetto e gestione dei materiali*, in Flaviano Celaschi (a cura di), *Materiali e componenti industriali per l'edilizia*, Maggioli, Rimini, pp. 11-38.
Di Diego Domenico,
(1995), "Riciclare si, ma con giudizio", *Interplastics*, mag.-giu., pp. 86-90.
GE Plastics,
(1995[1]), *Pannelli per tetti in Noryl e test europei*, Press Information, AdMil Industria, Milano.

GE Plastics,
(1995[2]), *A Living Reality*, brochure illustrativa, Cinisello Balsamo, Milano.

GE Plastics,
(1995[3]), *Programma "Living Environments Europe"*, brochure illustrativa, Cinisello Balsamo, Milano.

Hasemann W., Weltring R.,
(1995), "Building with Plastic Materials", *Kunststoffe plast europe*, n. 1, gen, pp. 27-28.

Herren Sigrid, et alii,
(1995), "Verbesserte Eigenschaften der Reststoffe durch Additive",
Kunststoffberater, n. 3, mar., pp. 26-35.

La Mantia Francesco Paolo,
(1995[1]), "Relazione tra parametri molecolari e proprietà reologiche e meccaniche", parte prima, *Macplas*, n. 165, feb., pp. 60-64.

La Mantia Francesco Paolo,
(1995[2]), "Relazione tra parametri molecolari e proprietà reologiche e meccaniche", parte seconda, *Macplas*, n. 167, apr., pp. 70-73.

La Mantia Francesco Paolo,
(1995[3]), "Relazione tra parametri molecolari e proprietà reologiche e meccaniche", parte terza, *Macplas*, n. 169, feb., pp. 63-66.

La Mantia Francesco Paolo,
(1995[5]), "Relazione tra parametri molecolari e proprietà reologiche e meccaniche", parte quinta, *Macplas*, n. 173, nov., pp. 90-92.

La Mantia Francesco Paolo (a cura di),
(1995[6]), *Il riciclo di materie plastiche*, Assorimap, Milano.

La Mantia Francesco Paolo,
(1995[7]), *Problems and Perspectives in Plastics Recycling*, relazione al convegno "Replastico", feb., 1995.

Leaversuch D. Robert,
(1995), "PPO Roofing Offers Weight and Cost Savings", *Modern Plastics International*, mar., pp. 37 -38.

Leghissa Sabino,
(1995), "Il riciclo di manufatti in compositi", *Seleplast*, n. 4, apr., pp. 44-47.

Longo Giuseppe,
(1995), *Tecnologia e Cultura*, conferenza tenuta l'11 nov.,presso il Politecnico di Milano, Facoltà di Architettura, annotazioni dell'autore.

Maffei Pier Luigi, Marchetti Massimo,
(1995[1]), "Le materie plastiche nell'edilizia. Componenti edilizi faccia vista", parte prima, *Seleplast*, n. 3, mar., pp. 16-32.
Maffei Pier Luigi, Marchetti Massimo,
(1995[2]), "Le materie plastiche nell'edilizia. Componenti edilizi faccia vista", parte seconda, *Seleplast*, n. 4, apr., pp. 30-38.
Maffei Pier Luigi, Marchetti Massimo,
(1995[3]), "Le materie plastiche nell'edilizia. Componenti edilizi faccia vista", parte terza, *Seleplast*, n. 5, mag., pp. 20-37.
Marino Bruno,
(1995), *Ricerca ed analisi di prodotti economici e validi da proporre alle amministrazioni ed agli enti pubblici nazionali, regionali e locali in vista dell'applicazione dell'articolo 9-quater comma 15 della legge 475/88*, R.Eco.Plast, Montemurlo (FI).
Morfini Luisa,
(1995), "Riduci, riutilizza, recupera", *Modulo*, n. 211, mag., pp. 388-396.
Negrotti Massimo,
(1995), *La natura dell'artificiale: strutture e processo fra riproduzione e innovazione*, conferenza tenuta l'1 dic., presso il Politecnico di Milano, Facoltà di Architettura, annotazioni dell'autore.
Pinetti Lucio,
(1995[1]), *Ipotesi Confindustria di recepimento della Direttiva 94/62/CE relativa agli imballaggi e rifiuti di imballaggio*, relazione al convegno "Materie plastiche di riciclo: sviluppi nell'attività di normazione ed evoluzione legislativa", Milano, 5 dic. 1995.
Pinetti Lucio (a cura di),
(1995[4]), *Il riciclo di materie plastiche in Italia. Verso nuovi orizzonti*,
Censimento dei riciclatori italiani 1994 a cura della Assorimap, Milano.
Rebeiz S. Karim,
(1995), "High-Performance Polyester Concrete Using Recycled PET", *Plastics in Building Construction*, n. 7, lug., pp. 8-12.
Valente T., et alii,
(1995), "Trattamento di compositi a matrice termoindurente alla fine del ciclo di vita", *Macplas*, n. 171, set., pp. 182-184.
Venosta Corrado,
(1995), *Certificazione delle materie plastiche di riciclo*, relazione al convegno "Materie plastiche di riciclo: sviluppi nell'attività di normazione ed evoluzione legislativa", Milano, 5 dic. 1995.

AA.VV.,
(1996[1]), *Revive Sistem. Sistema per la valorizzazione di rifiuti plastici misti*, Commissione delle Comunità Europee DG XIII/D3, Lussemburgo.
APME,
(1996), *European Index of Key Plastics Recycling Schemes*, Federchimica, Milano.
*Associazione dei produttori di materie plastiche in Europa
Bassan Mario, Galimberti Vittorio,
(1996), "Riciclaggio del calcestruzzo: le possibilità di sviluppo in Italia", *L'Edilizia*, n. 5/6, mag.-giu., pp. 29-35.
Coges,
(1996), *Esempi di applicazione di semilavorati in plastica eterogenea riciclata*, documentazione tecnica, S. Gervasio Bresciano (BS).
La Cirignola Angela,
(1996), *Materie plastiche*, Borsa di studio CNR ICITE, Sesto Ulteriano.
La Mantia Francesco Paolo,
(1996), *Il ruolo degli additivi nel riciclo delle materie plastiche*, documento interno, Dipartimento di Ingegneria Chimica dei Processi e dei Materiali, Università di Palermo.
Nardi Guido,
(1996), "Una scelta di valore culturale. Conoscenza, tecniche d'impiego e uso dei materiali nelle costruzioni", *Dedalo*, n. 1, gen., pp. 3-4.
PVC Information Council,
(1996), *PVC Recycling in Europe*, bollettino informativo, Bruxelles.
Rigamonti Ennio,
(1996), *Il riciclo dei materiali in edilizia*, Maggioli, Rimini.
Royal - Big. Mar.,
(1996), *Costruzioni italo-canadesi*, brochure illustrativa, Pernate (NO).
RPE,
(1996), *Riciclo Plastiche Eterogenee*, documentazione tecnica, Parma.
Stabilobloc,
(1996[1]), *La Solution pour un Monde plus Stable*, documentazione tecnica, Herstal, Belgio.
Stabilobloc,
(1996[2]), *On the Way to a more Stable World*, documentazione tecnica, Herstal, Belgio.

Timbron,
(1996[1]), *Timbron Classic Test Results*, documentazione tecnica, Birmingham, United Kingdom.

Timbron,
(1996[2]), *Man Made Timber for Building Products*, documentazione tecnica, Birmingham, United Kingdom.

Valle Luciano,
(1996), *Il dibattito sulla modernità*, conferenza tenuta il 12 gentile., presso il Politecnico di Milano, Facoltà di Architettura, annotazioni dell'autore.

Vredestein Rubber Recycling,
(1996), *Vredestein Rubber Recycling Keeps the World Moving*, bollettino informativo, Maastricht.

Zeon Kasei,
(1996), *Givoku. Recycled Plastic Log & Board*, brochure illustrativa, Tokio, Giappone.

Wenguang M., La Mantia F. P.,
(1996), "Processing and Mechanical Properties of Recycled PVC and of Homopolymer Blends with Virgin PVC", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 59, pp. 759-767.

BIBLIOGRAFIA RAGIONATA

Nella seguente bibliografia sono riportati i testi, le dispense, gli articoli su periodici e le voci enciclopediche consultati durante la stesura del testo.

Sul pensiero e sul progetto

Varisco Bernardino,
(1931), voce 'Cultura', in *Enciclopedia Italiana*, Istituto della Enciclopedia italiana Treccani, Roma, vol. XII, pp. 102-103.

Heidegger Martin,
(1950), *Der Ursprung des Kunstwerkes*, in Martin Heidegger, *Holzwegl*, Klostermann, Frankfurt am Main, 1950, (tr. it. di Pietro Chiodi, *L'origine dell'opera d'arte*, in Martin Heidegger, *Sentieri interrotti*, La Nuova Italia, Firenze, 1968).

Heidegger Martin,
(1951), 'Costruire, abitare, pensare', in *VVortrage und Aufsatze*, Gunther Neske, Pfullingen, Brd, 1954 (tr. it., *Saggi e discorsi*, Mursia, Milano, 1976).

Bellezza Vito,
(1956), voce 'Cultura', in *Dizionario Enciclopedico Italiano*, Istituto della Enciclopedia italiana Treccani, Roma, vol. III, p. 689.

Wright L. Frank,
(1957), *A testament*, Horizon Press Inc., New York (tr. it., Einaudi, Torino, 1963).

Adorno Theodor Wiesengrund,
(1960), 'Senza modello', Conferenza tenuta alla RIAS, 24 ago., pubblicata in *Ohne Leitbild. Parva Aesthetica*, Suhrkamp Verlag, Frankfurt, 1967 (tr. it., *Parva Aesthetica. Saggi 1958-1967*, Feltrinelli, Milano, 1979, pp. 103-127).

Assunto Rosaria,
(1963), voce 'Poetiche', in *Enciclopedia universale dell'arte*, vol. 10, Sansoni, 1963, coll. 670-679.

Adorno Theodor Wiesengrund,
(1965), 'Funzionalismo oggi', relazione al congresso del Deutsche Werkbund, Berlino, 23 ott., pubblicata in *Ohne Leitbild. Parva Aesthetica*, Suhrkamp Verlag, Frankfurt, 1967 (tr. it., *Parva Aesthetica. Saggi 1958-1967*, Feltrinelli, Milano, 1979, pp. 103-127).

Paci Enzo,
(1966), *Relazioni e significati*, Lampugnani Nigri, Milano.
Pareyson Luigi,
(1974), *Estetica. Teoria della formatività*, Sansoni, Firenze.
Bucaille Richard, Pesez Jean-Marie,
(1978), voce 'Cultura materiale', in *Enciclopedia*, vol. 4, Einaudi, Torino, pp. 271-305.
Leach Edmund,
(1978), voce 'Cultura/Culture', in *Enciclopedia*, vol. 4, Einaudi, Torino, pp. 238-270.
Norberg-Schulz Christian,
(1979), *Genius loci*, Electa, Milano.
Lesourne Jacques,
(1981), *Le milles sentiers de l'avenir*, Seghers, Paris, (tr. it. *Domani anno 2000*, Ed. del Sole 24ore, Milano, 1985).
Prigogine Ilya, Stengers Isabelle,
(1981), voce 'Vincolo', in *Enciclopedia*, vol. 14, Einaudi, Torino, pp. 1064-1080.
Maldonado Thomas,
(1987), *Il futuro della modernità*, Feltrinelli, Milano.
Cortellazzo Manlio, Zolli Paolo,
(1988), *Dizionario etimologico della lingua italiana*, Zanichelli, Bologna.
Bisogno Paolo,
(1990), *Prometheus. La morte di Newton. Il nuovo paradigma scientifico*, 'Natura e ambiente' n. 9, Angeli, Milano, pp. 65-104.
Bertoldini Marisa,
(1991), *Progettare l'abitare: le basi per l'indagine*, in Marisa Bertoldini (a cura di), *L'atto progettuale. Strutture e percorsi*, 1991, CittàStudi, Milano, pp.11-24.
Campioli Andrea,
(1991), La critica della poetica e dello stile, in Guido Nardi, Andrea Campioli, Anna Mangiarotti, *Frammenti di coscienza tecnica. Tecniche esecutive e cultura del costruire*, Angeli, 1991, Milano, pp. 31-62.
Truppi Carlo,
(1991), *Tra costruzione e progetto. Classico e moderno come scenario del costruire*, Angeli, Milano.

Campioli Andrea,
(1992), *I presagi di un nuovo costruire. Il linguaggio delle tecniche esecutive nell'architettura della seconda età della macchina*, Angeli, Milano, 2. ed.
Truppi Carlo,
(1994), *Continuità e mutamento. Il tempo nell'innovazione delle tecniche e nell'evoluzione dell'architettura*, Angeli, Milano.
Campioli Andrea,
(1994), *La struttura e l'organizzazione del progetto negli interventi edilizi complessi: gli specialismi, le fasi, gli operatori*, in Claudio Molinari e Andrea Campioli (a cura di), *Formazione per il progetto. Progetto per la formazione. Metodi, tecniche e nuovi operatori per una gestione innovativa dell'attività progettuale*, Angeli, Milano, 1994, pp. 29-44.
Longo Giuseppe,
(1995), *Tecnologia e Cultura*, conferenza tenuta l'11 nov.,presso il Politecnico di Milano, Facoltà di Architettura, annotazioni dell'autore.
Negrotti Massimo,
(1995), *La natura dell'artificiale: strutture e processo fra riproduzione e innovazione*, conferenza tenuta l'1 dic., presso il Politecnico di Milano, Facoltà di Architettura, annotazioni dell'autore.

Sulla cultura tecnologica

Calogero Guido,
(1937), voce 'Tecnica', in *Enciclopedia Italiana*, Istituto della Enciclopedia italiana Treccani, Roma, vol. XXXIII, p. 378.
Leroi-Gourhan Andrè,
(1943), *Evolution et techniques. L'homme et la materie*, Albin Michel, Paris.
Heidegger Martin,
(1953), 'La questione della tecnica', conferenza tenuta il 18 nov.,in un ciclo dal titolo 'Le arti della tecnica', pubblicata in *Vortrage und Aufsatze*, Gunther Neske, Pfullingen, Brd, 1954 (tr. it., *Saggi e discorsi*, Mursia, Milano, 1976).
Singer Charles, et alii,
(1961), *Storia della tecnologia*, vol.3, Boringhieri, Torino.
Kubach Hans Erich,
(1972), *Architettura romanica*, Electa, Milano.

Briggs Martin Shaw,
(1974), *The Architect in History*, Da Capo Press, New York.
Gratton Livio,
(1979), voce 'Materia', in *Enciclopedia*, vol. 8, Einaudi, Torino, pp. 878-929.
Wyrobisz Andrzej,
(1979), voce 'Materiali', in *Enciclopedia*, vol. 8, Einaudi, Torino, pp. 930-960.
Cresswell Robert,
(1981), voce 'Tecnica', in *Enciclopedia*, vol. 13, Einaudi, Torino, pp. 971-994.
Formaggio Dino,
(1981), 'L'arte, il lavoro, le tecniche', in Mikel Dufrenne, Dino Formaggio, Trattato di estetica, 2 voll., Mondadori, Milano, pp. 101-145.
Bairati Eleonora, Finocchi Anna,
(1984), *arte in Italia. Lineamenti di storia e materiali di studio*, Loescher, Torino, vol. 1°.
Nardi Guido,
(1986), *Le nuove radici antiche. Saggio sulla questione delle tecniche esecutive in architettura*, Angeli, Milano.
Pawley Martin,
(1987), "Technology Transfer", *Architectural Review*, n. 1087, set., pp. 31-39.
Nardi Guido,
(1988), *Genius artis e genius materialis*, in Marisa Bertoldini (a cura di), *La casa tra tecniche e sogno. La costruzione della propria casa in un esame transdisciplinare*, Angeli, Milano, pp. 127-144.
Mangiarotti Anna,
(1989), *Gli elementi tecnici del progetto. Trasformazioni e possibilità espressive della materia in architettura*, Angeli, Milano.
Molinari Claudio (a cura di),
(1989), *Manutenzione in edilizia. Nozioni, problemi, prospettive*, Angeli, Milano.
Vitale Augusto, Perricioli Massimo, Pone Sergio,
(1989), *Architettura e costruzione. Il problema della tecnica negli scritti dei protagonisti dell'architettura moderna*, Angeli, Milano.
Mangiarotti Anna,
(1991), *L'innovazione nel progetto. Esempi di architettura contemporanea*, Angeli, Milano.

Nardi Guido,
(1991), *Gli elementi costitutivi del progetto: genealogia degli archetipi del costruire*, in Guido Nardi, Andrea Campioli, Anna Mangiarotti, *Frammenti di coscienza tecnica.Tecniche esecutive e cultura del costruire*, Angeli, 1991, Milano, pp. 13-29.
Sinopoli Nicola,
(1991), "L'innovazione tecnica nelle costruzioni", Sinopie, n. 6, mar. 1991, pp. 10-16.
Ciribini Giuseppe,
(1992), *Cultura tecnologica ed epistemologia del progetto*, in Virginia Gangemi (a cura di), *Cultura e impegno progettuale*. *Orientamenti e strategie oltre gli anni '90*, Angeli, Milano, 1992, pp. 53-61.
Bertoldini Marisa,
(1993), *La cultura del progetto*, in Monica Zappelli (a cura di), *Seminari di cultura tecnologica della progettazione*, 1993, CittàStudi, Milano, pp. 75-92.
Campioli Andrea,
(1993), *Il contesto del progetto*, Angeli, Milano.
Nardi Guido,
(1993), *Prefazione*, in Andrea Campioli, *Il contesto del progetto*, Angeli, Milano, pp. 7-11.
Perrault Dominique,
(1993), *L'innovazione tecnica in architettura attraverso la lettura di alcuni progetti*, conferenza tenuta il 29 gen., presso il Politecnico di Milano, Facoltà di Architettura, in Monica Zappelli (a cura di), *Seminari di Cultura Tecnologica della Progettazione*, 1993, CittàStudi, Milano, pp. 121-164.
Nardi Guido,
(1996), "Una scelta di valore culturale. Conoscenza, tecniche d'impiego e uso dei materiali nelle costruzioni", *Dedalo*, n. 1, gen., pp. 3-4.

Sulle materie plastiche

Powell C. Peter,
(1983), *Engineering with Polymers*, Chapman and Hall, London.
Manzini Ezio,
(1986), *La materia dell'invenzione*, Arcadia Edizioni, Milano.
ICI Polyurethanes,
(1988), *Elastomeri poliuretanici*, documentazione tecnica, Ternate (VA).

Binetti Giovanni, et alii,
(1988), *300 idee di nuovi materiali*, Edizioni del Sole 24 Ore, Milano.
Ciba Geigy,
(1989), *Additives for PVC Processing*, documentazione tecnica Origgio (MI).
Elf Atochem,
(1989), *Photoprotection de polymeres par le PVDF*, documentazione tecnica, Milano.
GE Plastics,
(1990), *Tecnopolimeri*, documentazione tecnica, Cinisello Balsamo (MI).
Hellerich Walter, Harsch Gunther, Haenle Siegfried,
(1990), *Prontuario delle materie plastiche*, Tecniche Nuove, Milano, 3ª ed.
AA.VV.,
(1991), *Neolite. Metamorfosi delle plastiche*, Domus, Milano.
Basf,
(1992), *Thermoplastics, Composites, Expanded plastics*, documentazione tecnica, Milano.
ICI Polyurethanes,
(1992), *Polyurethanes in Refrigeration*, documentazione tecnica, Ternate (VA).
ICI Polyurethanes,
(1993), *Polyurethanes for Furniture*, documentazione tecnica, Ternate (VA).
Mills J. Nigel,
(1993), *Plastics. Microstructure & Engineering Applications*, Edward Arnold, Londra, 2ª ed.
Saechtling Hansjurgen,
(1993), *Manuale delle materie plastiche*, Tecniche Nuove, Milano, 6ª ed.
AA.VV.,
(1995[17]), "Additives. The Vital Ingredients", *European Plastics News*, n. 5, mag., pp. 28-37.
APME*,
(1995[2]), *Plastiche in prospettiva*, Federchimica, Milano.
*Associazione dei produttori di materie plastiche in Europa

Celaschi Flaviano,
(1995), *Progetto e gestione dei materiali*, in Flaviano Celaschi (a cura di), *Materiali e componenti industriali per l'edilizia*, Maggioli, Rimini, pp. 11-38.

ICI Polyurethanes,
(1995), *Polyurethanes for Automotive*, documentazione tecnica.

Dupont,
(1995), *Dall'idea iniziale alla commercializzazione*, documentazione tecnica, Cologno Monzese (MI).

La Mantia Francesco Paolo,
(1995[1]), "Relazione tra parametri molecolari e proprietà reologiche e meccaniche", parte prima, *Macplas*, n. 165, feb., pp. 60-64.

La Mantia Francesco Paolo,
(1995[2]), "Relazione tra parametri molecolari e proprietà reologiche e meccaniche", parte seconda, *Macplas*, n. 167, apr., pp. 70-73.

La Mantia Francesco Paolo,
(1995[3]), "Relazione tra parametri molecolari e proprietà reologiche e meccaniche", parte terza, *Macplas*, n. 169, feb., pp. 63-66.

La Mantia Francesco Paolo,
(1995[4]), "Relazione tra parametri molecolari e proprietà reologiche e meccaniche", parte quarta, *Macplas*, n. 171, set., pp. 128-130.

La Mantia Francesco Paolo,
(1995[5]), "Relazione tra parametri molecolari e proprietà reologiche e meccaniche", parte quinta, *Macplas*, n. 173, nov., pp. 90-92.

Leghissa Sabino,
(1995), "Il futuro dei polimeri", *Seleplast*, n. 4, apr., pp. 39-44.

Locati Giancarlo, Poggio Sergio, Rathenow Jorge,
(1995), "Considerazioni sulla valutazione del comportamento termico dei polimeri", *Macplas*, n. 172, ott., pp. 58-61.

Rohm and Haas,
(1996), *Engineering Resin Additives*, documentazione tecnica, Milano.

Sugli impieghi delle materie plastiche in edilizia

Skeits Irving,
(1966), [titolo originale non riportato], (tr. it. di Liveriero Carlo, *Le materie plastiche nell'edilizia*, Alba Edizioni, Torino, 1971).

Vedril,
(1988) *Acrylic Sheet for the Building Industry*, documentazione tecnica, Rho (MI).

Cognard Philippe,
(1989), Les applications industrielles des matériaux composites, Editions du Moniteur, Paris, 2 voll.
Simonelli Giuliano,
(1989), "La casa laboratorio", *Modulo*, n. 157, dic., pp. 1502-1509.
Vedril,
(1989) *Acrylic Sheet for Sanitary Ware*, documentazione tecnica, Rho (MI).
AA.VV.,
(1990), "Plastics in Construction: Finding New Niches", *Journal of Light Construction*, lug., pp. 7-11.
GE Plastics,
(1990), *Lastre Lexan per vetrature di sicurezza*, manuale tecnico, Cinisello Balsamo (MI).
Hollaway Leonard,
(1990), *Polymers and polymer composites in construction*, Teldford, London.
AIPE*,
(1991[1]), *L'AIPOR e la normativa sulla prevenzione incendi*, documentazione tecnica, Milano.
*Associazione Italiana Polistirolo Espanso
AIPE*,
(1991[2]), *Isolare. Polistirene espanso sinterizzato in edilizia*, documentazione tecnica, Milano.
*Associazione Italiana Polistirolo Espanso
Gordon E. James,
(1991), *Strutture sotto sforzo*, Zanichelli, Bologna.
Abet Laminati,
(1992), *MEG, material exterior grade*, documentazione tecnica, Cinisello Balsamo (MI).
Maura Giancarlo,
(1992), *Materiali per l'edilizia. Schede tecniche*, Edizioni DEI, Roma, 2 ed.
Pistilli Marco,
(1992), "Plastica e cls fibrorinforzato per la Nestehaus", L'Edilizia, n. 6, apr., pp. 421-423.
Simonelli Giuliano,
(1992), "E per vestito un guscio di plastica", *Modulo*, n. 179, gen. pp. 190-196.
Associazione Nazionale Serramenti PVC,
(1993), *I serramenti esterni in PVC. Requisiti e prestazioni*, documentazione tecnica, Milano.

GE Plastics,
(1993), *Architetture trasparenti*, brochure illustrativa, Cinisello Balsamo (MI).
ICI Polyurethanes,
(1993), *Poliuretani per l'edilizia*, documentazione tecnica, Ternate (VA).
Mariani Paolo,
(1993-94), Tesi di Laurea, *I materiali compositi a matrice polimerica in architettura: prospettive d'utilizzo in ambito strutturale*, relatore Guido Nardi, correlatore Laura Pedrotti, Politecnico di Milano, Facoltà di Architettura.
AA.VV.,
(1994[1]), "Isolamento edilizio e materie plastiche", *Macplas*, n. 158, mag., pp. 65-74.
AA.VV.,
(1994[2]), "Serramento tuttaplastica", *Macplas*, n. 159, giu., pp. 64-65.
Jagerschimdt M. C.,
(1994), "Fuci: un project en bétor puor les plastiques", *Caoutchoucs et Plastiques*, n. 730, mar., pp. 32-34.
Macchi Giulia,
(1994), "Verso strati specializzati", *Modulo*, n. 204, set., pp. 806-812.
Mariani Giorgio,
(1994), "Le materie plastiche nel settore dell'edilizia", *Interplastics*, n.6, nov. - dic., pp. 64-70.
AA.VV.,
(1995[15]), "Keeping Up Appearances", *European Plastics News*, n. 2, feb., pp. 25-26.
AA.VV.,
(1995[16]), "Cantieri aperti per l'EPS", *Macplas*, n. 167, apr., pp. 79-81.
APME*,
(1995[1]), *Building and construction,* Federchimica, Milano.
*Associazione dei produttori di materie plastiche in Europa
APME*,
(1995[3]), *Plastics Make it Possible in Urban Development*, Federchimica, Milano.
*Associazione dei produttori di materie plastiche in Europa
GE Plastics,
(1995[2]), *A Living Reality*, brochure illustrativa, Cinisello Balsamo, (MI).

GE Plastics,
(1995[3]), *Programma "Living Environments Europe"*, brochure illustrativa, Cinisello Balsamo, (MI).
Hasemann W., Weltring R.,
(1995), "Building with Plastic Materials", *Kunststoffe plast europe*, n. 1, gen, pp. 27-28.
Maffei Pier Luigi, Marchetti Massimo,
(1995[1]), "Le materie plastiche nell'edilizia. Componenti edilizi faccia vista", parte prima, *Seleplast*, n. 3, mar., pp. 16-32.
Maffei Pier Luigi, Marchetti Massimo,
(1995[2]), "Le materie plastiche nell'edilizia. Componenti edilizi faccia vista", parte seconda, *Seleplast*, n. 4, apr., pp. 30-38.
Maffei Pier Luigi, Marchetti Massimo,
(1995[3]), "Le materie plastiche nell'edilizia. Componenti edilizi faccia vista", parte terza, *Seleplast*, n. 5, mag., pp. 20-37.
Vasselle J.B.,
(1995), "Plastiques dans le batiment. Une pénétration réussie", *Plastiques Modernes et Élastomerés*, apr., pp. 64-67.
Royal - Big. Mar.,
(1996), *Costruzioni italo-canadesi*, brochure illustrativa, Pernate (NO).

Sulla cultura tecnologica del riciclo

Manzini Ezio,
(1990[1]), *"Chiudere il cerchio", le intenzioni del convegno*, relazione
introduttiva a nome del Comitato promotore del convegno "Chiudere il cerchio. Progetto, prodotto, ambiente.", Politecnico di Milano, Facoltà di Architettura, feb. 1990.
Manzini Ezio,
(1990[2]), *Artefatti. Verso una nuova ecologia dell'ambiente artificiale*, Domus Academy, Milano.
Molinari Claudio,
(1990), *Il caso dei componenti edilizi*, relazione al convegno "Chiudere il cerchio. Progetto, prodotto, ambiente.", Politecnico di Milano, Facoltà di Architettura, feb. 1990.
Nardi Guido,
(1990), *Perché "chiudere il cerchio"*, introduzione al convegno "Chiudere il cerchio. Progetto, prodotto, ambiente.", Politecnico di Milano, Facoltà di Architettura, feb. 1990.

Castiglione Diana,
(1991), *Le vite della plastica*, in AA.VV., *Neolite.Metamorfosi delle plastiche*, Domus, Milano, 1991.
Brambilla Marco, Gargantini Mario,
(1992), *I rifiuti solidi urbani e la raccolta differenziata*, AMSA, Milano.
Bresso Mercedes,
(1992), *Il produttore / riproduttore: le implicazioni economiche*, relazione al convegno "fare*dis*fare. Lo scenario del produttore riproduttore", Politecnico di Milano, 23-24 ott. 1994.
Lundhvist Thomas,
(1992), *L'estensione della responsabilità del produttore*, relazione al convegno "fare*dis*fare. Lo scenario del produttore riproduttore", Politecnico di Milano, 23-24 ott. 1994.
Manzini Ezio,
(1992), *"Fare Disfare". Un quadro problematico*, relazione al convegno "fare*dis*fare. Lo scenario del produttore riproduttore", Politecnico di Milano, 23-24 ott. 1994.
Morfini Luisa,
(1992), "Dolce casa inquinata...", *Modulo*, n. 185, ott., pp. 1052-1058.
Pellegrini M.,
(1992), "La normativa regionale e statale sulle materie prime secondarie, *L'industria dei laterizi*, n. 14, mar.-apr., pp.118-119.
Morfini Luisa,
(1993[1]), "Case riciclate", *Modulo*, n. 195, ott., pp. 934-938.
Pieroni Marcello,
(1993), *Analisi comparativa degli schemi legislativi in Germania, Francia, Italia e Comunità Europea*, relazione al convegno "Imballaggi e rifiuti da imballaggi. Legislazione comunitaria e normative nazionali a confronto, Milano, 17 dic. 1993.
Rigamonti Ennio,
(1993), "Riciclo di componenti edilizi: un quadro d'insieme", *Modulo*, n. 195, ott., pp. 935-938.
Abraham M. Dulcy, et alii,
(1994), *Recycling of Destructed Building Products*, relazione al convegno "Sustainable Construction", Tampa (Florida, USA), 6-9 nov. 1994.
Addeo Antonio,
(1994), "Punto di vista di un centro di ricerca", *Macplas*, n. 160, lug., pp. 48-50.

Bressi Giorgio,
(1994), *Recycling of Construction & Demolition Waste: the Italian Technology*, relazione al convegno "Sustainable Construction", Tampa (Florida, USA), 6-9 nov. 1994.
Craven J. David, et alii,
(1994), *Construction Waste and a New Design Methodology*, relazione al convegno "Sustainable Construction", Tampa
(Florida,
USA), 6-9 nov. 1994.
De Pauw Carlo, et alii,
(1994), *Reuse of Demolition Waste as Aggregates in Concrete. A New Challenge or the Re-Introduction of Old Practise?*, relazione al convegno "Sustainable Construction", Tampa (Florida, USA), 6-9 nov. 1994.
Frank E. Robert,
(1994), *Construction and Demolition Wood Waste Used in Wood Cement Composites*, relazione al convegno "Sustainable Construction", Tampa (Florida, USA), 6-9 nov. 1994.
Golinelli Clara,
(1994), *Macchine per abitare nel 2000*, in AA.VV., *Housing 6*, Etas Libri, Milano, 1994, pp. 2-5.
Hamassaki T. Luiz, Sbrighi Neto Claudio,
(1994), *Technical and Economic Aspects of Construction/Demolition Waste Utilization*, relazione al convegno "Sustainable Construction", Tampa (Florida, USA), 6-9 nov. 1994.
Heino Erja,
(1994), *Recycling of Construction Waste*, relazione al convegno "Sustainable Construction", Tampa (Florida, USA), 6-9 nov. 1994.
Marziantonio Roberto, Schianchi Francesco,
(1994), "Da rifiuti a sottoprodotti: un percorso concettuale", *Newsletter*, n. 1, set., p. 14.
Maydl Peter,
(1994), *Possibilities of Reusing Construction Waste. A Feasibility -Study for the City of Vienna 1993*, relazione al convegno "Sustainable Construction", Tampa (Florida, USA), 6-9 nov. 1994.
Omodeo Salè Serena (a cura di),
(1994), *Architectura & natura. Cose e luoghi per abitare il pianeta*, Mazzotta, Milano.
Ruch Mark, Rentz Otto,
(1994), *Demolition Waste management Strategies in France and Germany*, relazione al convegno "Sustainable Construction", Tampa (Florida, USA), 6-9 nov. 1994.

Suriano Salvatore,
(1994), "Una nuova legge sui rifiuti è necessaria o inutile?", *Newsletter*, n. 2, dic., p. 3.
Tinker A. John,
(1994), *Using Waste Materials as in an Aggregate in Low Thermal Conductivity Mortars*, relazione al convegno "Sustainable Construction", Tampa (Florida, USA), 6-9 nov. 1994.
AA.VV.,
(1995[1]), "La Direttiva Prodotti da costruzione", Nuova Finestra, n. 3, mar., pp. 336-348.
Pinetti Lucio,
(1995[1]), *Ipotesi Confindustria di recepimento della Direttiva 94/62/CE relativa agli imballaggi e rifiuti di imballaggio*, relazione al convegno "Materie plastiche di riciclo: sviluppi nell'attività di normazione ed evoluzione legislativa", Milano, 5 dic. 1995.
Pinetti Lucio,
(1995[2]), *Residui destinati a riutilizzo: stato attuale della normativa,* relazione al convegno "Materie plastiche di riciclo: sviluppi nell'attività di normazione ed evoluzione legislativa", Milano, 5 dic. 1995.
Pinetti Lucio,
(1995[3]), *Iniziative legislative in materia di rifiuti e di riciclo*, relazione al convegno "Materie plastiche di riciclo: sviluppi nell'attività di normazione ed evoluzione legislativa", Milano, 5 dic. 1995.
Morfini Luisa,
(1995), "Riduci, riutilizza, recupera", *Modulo*, n. 211, mag., pp. 388-396.
Bassan Mario, Galimberti Vittorio,
(1996), "Riciclaggio del calcestruzzo: le possibilità di sviluppo in Italia", *L'Edilizia*, n. 5/6, mag.-giu., pp. 29-35.
Rigamonti Ennio,
(1996), *Il riciclo dei materiali in edilizia*, Maggioli, Rimini.
Stone Italiana,
(1996), *Volume monografico illustrativo*, Zimella (VR).

Sulle tecnologie di riciclo di materie plastiche
Wetzel J. P.,
(1987), "Waste Management and Plastics Recycling. A Status Report", *Swiss Plastics*, n. 1 - 2, set., pp. 7-16.

Addeo Antonio,
(1989), *Technologies and Materials for Panels: Mass Production, Investments, Costs*, relazione al convegno "Le materie plastiche nell'innovazione dell'auto e del veicolo industriale", 4-5 ott. 1989, Torino.

Basf,
(1990), *Styropor. Utilizzazione/Smaltimento*, Informazione tecnica, Milano.

Cooperativa Ambiente (a cura di),
(1990), *Produzione ed utilizzo del combustibile derivato dai rifiuti (RDF)*, in Regione Toscana, *Studi e ricerche, limitazione e recupero dei rifiuti, materie seconde*, vol. 2, pp. 9-21, 1990.

Severino Febo, Coccia G. Maria,
(1990), *Recupero postconsumo e riciclo delle materie plastiche*, Edizione IVR, Rozzano.

EVC*,
(1991), *Riciclo del PVC. Meno rifiuti, maggior utilità*, documentazione tecnica, Assago (MI).
*European Vinyls Corporation

Vert Michel,
(1991), "Biodegrables. Réalités et perspectives", *Caoutchoucs et Plastiques*, n. 706, giu - lug., pp. 71-76.

APME,
(1992), *Recycling in Action*, Federchimica, Milano.
*Associazione dei produttori di materie plastiche in Europa

Bellio E., Patti N.,
(1992), *Materie plastiche da riciclo come modificante per bitume*, relazione al convegno AIM "Riciclo di materiali plastici", 26 giu. 1994, Milano.

Kroesen Karl-Wihelm,
(1992), *Recent Development in the Chemical Recycling of Flexible Polyurethanes*, relazione alla conferenza "Utech 92",ù
31 mar.-2 apr.1992, Hague, Olanda.

La Mantia Francesco Paolo,
(1992), "Recycling of Heterogeneous Plastics Wastes. Blend with Low Density Polyethylene", *Polymer Degradation and Stability*, n. 37, pp. 145-148.

Novamont,
(1992), *Mater-Bi the Biodegradable Thermoplastic Material*, documentazione tecnica, Novara.

Simona,
(1992), *Materiali e tecnologie di produzione per il rispetto dell'ambiente*, relazione al seminario "Sign Italia '92", 27-29 nov. 1992, Milano.
Solvay,
(1992), *PVC. Sale e petrolio*, documentazione tecnica, Milano.
Starke L., et alii,
(1992), "Material Recycling of Mixed Plastics", *Kunststoffe German*
Plastics 82, n. 1, gen., pp. 12-15.
AA.VV.,
(1993[1]), "Dalla materia plastica all'humus", *Research*, Bayer, n. 7, pp. 86-93.
Abet Laminati,
(1993), *Tefor. Laminato riciclato*, documentazione tecnica, Cinisello Balsamo (MI).
APME*,
(1993), *Plastica - Ottimizzazione delle risorse*, Federchimica, Milano.
*Associazione dei produttori di materie plastiche in Europa
Basf,
(1993), *Riciclo dei tecnopolimeri*, relazione al convegno "TMP", Saronno, 10 ott. 1993.
Dupont,
(1993), *Reactive Polymers. For Improved compatibility and Stability During Recycling Operations*, documentazione tecnica, Cologno Monzese (MI).
GE Plastics,
(1993), *Productive Recycling of Engineering Thermoplastics*, documentazione tecnica, Cinisello Balsamo (MI).

La Mantia Francesco Paolo,
(1993), "Recycling of Heterogeneous Plastics Wastes.The Role of Modifier Agents", *Polymer Degradation and Stability*, n. 42, pp. 213-218.
Matteoli Bardzky Mino,
(1993), *Il mercato del PET: materia prima e rigenerato*,relazione al convegno "Riciclare '93. Il PET", Assorimap, Milano.
Replastic,
(1993[1]), *Impianti di selezione*, documentazione tecnica, Milano.

Replastic,
(1993[2]), *Impianti di rilavorazione*, documentazione tecnica,Milano.
Replastic,
(1993[3]), *Specifiche materie prime, semilavorati e prodotti finiti del sistema Replastic per il riciclaggio fisico*, documentazione tecnica, Milano.
Rieb Reinhard,
(1993), *Plastics Recycling - options and limitations*, Press Information, Bayer, Leverkusen.
SNIA Tecnopolimeri,
(1993), *Il riciclo degli Engineering Polymer. Perdita di caratteristiche meccaniche*, relazione al convegno "TMP", Saronno, 10 ott. 1993.
Kurtz Karl-Rudolph,
(1993), "Riciclaggio dei materiali: possibilità e limiti", *Plastics*, gen.-feb., pp. 66-73.
AA.VV.,
(1994[3]), "Sempre a proposito di EPS", *Macplas*, n. 163, dic., pp. 39-40.
AA.VV.,
(1994[4]), "Sistemi di recupero e riciclo in vetrina", *Macplas*, n. 162, nov., pp. 43-46.
AA.VV.,
(1994[4]), "Ecofelpe", *Macplas*, n. 157, mag., p. 114.
APME,
(1994), *Il ruolo dell'EPS*, Federchimica, Milano.
*Associazione dei produttori di materie plastiche in Europa
Baglioni Adriana, et alii,
(1994), *The Scrap Tires as Building Material*, relazione al convegno "Sustainable Construction", Tampa (Florida, USA), 6-9 nov. 1994.
Bayer,
(1994), *Recycling of Engineering Thermoplastics - Case Studies*, documentazione tecnica, Milano
Bertucelli L., van der Wal H.,
(1994), "Tecnologie in opzione per il riciclo", *Macplas*, n. 159, lug. -ago., pp. 125-127.
Camino Giovanni,
(1994), *Effetto della contaminazione dei materiali polimerici sul riciclo*, relazione al convegno AIM "Sviluppi e tendenze del riciclo di materie plastiche", Milano 3 mag. 1994.

Ciba Geigy,
(1994), *Recyclostab. New Life for Plastics*, documentazione tecnica, Origgio (MI).
De Groote P:, Godard P.,
(1994), *Mixed Plastics Compatibilization*, APME, Technical and Environmental Centre, Bruxelles.
Dehay Georges,
(1994), *Evaluation of Some Fundamental Mechanical Properties of Recycled Mixed Plastics*, APME, Technical and Environmental Centre, Bruxelles.
Fabiani Riccardo,
(1994), *Il polistirene: profilo informativo*, relazione al convegno "Riciclare '94. Il Polistirene", Assorimap, Milano.
Fiat Auto,
(1994), *F.A.RE. Fiat Auto Recycling*, documentazione tecnica, Torino.
Flynn L. Auchey,
(1994), *The Use of Recycled High Density Polyethylene Fibers as Secondary Reinforcement in Portland Cement Concrete*, relazione al convegno "Sustainable Construction", Tampa (Florida, USA), 6-9 nov. 1994.
Fregola Mario, et alii,
(1994), "Recupero funzionale dei tecnopolimeri: esempi applicativi", *Plast*, feb., pp. 103-109.
Hausmann Karlheinz,
(1994), *Post Reactor Modified Polymers. Availability. Applications. New Horizons*, relazione al convegno "Speciality Plastics'94", Zurigo, 24-26 ott 1994.
ICI Polyurethanes,
(1994), *Polyurethanes Recycling and Waste Managemen*t, documentazione tecnica, Ternate (VA).
La Mantia Francesco Paolo, et alii,
(1994[1]), "Recycling of Carbonated Beverage Bottles", *Polimer Recycling*, vol. 1, n. 1, pp. 33-45.
La Mantia Francesco Paolo, et alii,
(1994[2]), "Filled Recycled PET/HDPE Blends", *Polimer Recycling*, vol. 1, n. 2, pp. 23-35.
Liebold R.,
(1994),"Recycling von Formteilen aus Faserverbund-Werkstoffen", *Kunststoffberater*, n.12, dic., pp. 28-33 (tr. it. Sabino Leghissa, "Il riciclo di manufatti in compositi", *Seleplast*, n. 4, apr., 1995, pp. 44-47).

Mancioli E., Pagani F.,
(1994), *Stabilizzazione delle materie plastiche riciclate*, relazione al relazione al convegno AIM "Sviluppi e tendenze del riciclo di materie plastiche", Milano 3 mag. 1994.

Peuch Patrick,
(1994), "Corsa al recupero per l'industria europea della plastica e dell'automobile", *Macplas*, n. 163, dic., pp. 37-38.

Piardi Silvia, et alii,
(1994), *Recycled Polymers - Suggestions for their Applications: Sound Attenuation Biowalls*, relazione al convegno "Sustainable Construction", Tampa (Florida, USA), 6-9 nov. 1994.

Pilati Francesco,
(1994), *Analisi critica delle tecnologie di riciclo: un esempio, il PET*, relazione al convegno AIM "Sviluppi e tendenze del riciclo di materie plastiche", Milano 3 mag. 1994.

Pinetti Lucio (a cura di),
(1994[2]), *Il riciclo di materie plastiche in Italia. Imprese e materiali: verso nuovi equilibri*, Censimento dei riciclatori italiani 1993 a cura della Assorimap, Milano.

Plumier A.,
(1994), *Perpectives d'utilisation de blocs constitues de plastiques recycles dans les constructions du Genie Civil*, conferenza all'Istitut du Genie Civil, Università di Liegi, 9 mar. 1994.

Replastic,
(1994), *Riciclaggio dei contenitori in plastica: sviluppo industriale nel bacino Lombardia Ovest*, documentazione tecnica, Milano.

Santos P. Carlos,
(1994), *Recycled Cork-board, Expanded Polystyrene and Autoclaved Aerated Concrete. Experimental Research Study as Granular Loose-fill Insulations*, relazione al convegno "Sustainable Construction", Tampa (Florida, USA), 6-9 nov. 1994.

Scott J. A. N.,
(1994), *The Mechanical Recycling of Mixed Plastics Waste*, APME, Technical and Environmental Centre, Bruxelles.

Shell Chemicals,
(1994), *Expandable Polystyrene and the Environment*, documentazione tecnica, Londra.

Simona,
(1994), *PVC-Platten und Rohre fur den Bausektor*, documentazione tecnica, Milano.

Thomas G., Pfaendner,
(1994), *Evaluation of the Properties of Post - Consumer Mixed Plastics and Virgin Olastics Blends - Compression and Injection Moulded Specimens*, APME, Technical and Environmental Centre,
Bruxelles.
Uhlen Herbert,
(1994), "Finestre pronte al riciclo", *Macplas*, n. 161,ott., pp. 41-42.
Wenguang M., La Mantia F. P.,
(1994[1]), "Riciclo di materiali polimerici eterogenei", *Macplas*, n. 159, lug.-ago., pp. 35-40.
Wenguang M., La Mantia F. P.,
(1994[2]), "Riciclo di materiali polimerici eterogenei", *Macplas*, n. 162, nov., pp. 36-40.
Wigotsky Victor,
(1994), "Recycling", *Plastics Engineering*, n. 12, dic., pp. 20-24.
AA.VV.,
(1995[3]), "Dalla teoria alla pratica. Diventà realtà il riciclo meccanico di serramenti in PVC", *Macplas*, n. 173, nov., pp. 58-61.
AA.VV.,
(1995[4]), "Recycled Tires into Concrete", *Plastics in Building Construction*, n. 7, lug., p. 3.
AA.VV.,
(1995[5]), "Schallschlucker aus dem gelben Sack", *Bauen mit Kunststoffen*, n. 1, gen., pp. 16-18.
AA.VV.,
(1995[6]), "Scarti in pista", *Macplas*, n. 167, apr., p. 45.
AA.VV.,
(1995[7]), "New Processing Technology for Low Cost Plywood Replacement", *Plastics in Building Construction*, n. 7, lug.,pp. 3-4.
AA.VV.,
(1995[8]), "Ecofibre", *Macplas*, n. 174, dic., p. 33.
AA.VV.,
(1995[9]), "PET sugli scudi", *Macplas*, n. 168, mag., pp. 39-40.
AA.VV.,
(1995[10]), "Valorisation: la filière s'organize", *Plastiques Modernes et Elastomères*, lug.-ago., pp. 18-22.
AA.VV.,
(1995[11]),"Recycling von gefarbten Kunststoffen", *Kunststoffe 85*, n. 2, feb., p. 224.

AA.VV.,
(1995[12]), "Plastiques mèlangès, les solutions de la plasturgie", *Plastiques Modernes et Elastomères*, lug.-ago., pp. 22-24.
AA.VV.,
(1995[13]), "Scenari futuri in Europa", *Macplas*, n. 165, feb., pp. 39-41.
AA.VV.,
(1995[14]), "Nouveau procédé de recyclage des matiéres plastiques", *La Construction*, n. 15-16, apr.
AIPE*,
(1995), *Il polisterene espanso e l'ambiente.Impatto ambientale dei materiali da costruzione in polistirene espanso*, documentazione tecnica, Milano.
*Associazione Italiana Polistirolo Espanso
Bayer,
(1995), *Bayer all'avanguardia nel riciclaggio delle materie plastiche*, Press Information, ago., Milano.
Berghaus U., Rettberg M.,
(1995), "Stoffliches Rezyklieren", *Kunststoffe 85*, n. 2, feb., pp. 202-205.
Bledzki K. Andrzej, Goracy Krzysztof,
(1995), "Technische Verwertungs-moglichkeiten von vernetzten Kunststoffen", *Kunststoffberater*, n. 5, mag., pp. 33-38.
British Plastics Federation,
(1995), *Directory of UK Companies Involved in the Recycling of Plastics*, Londra.
Butler Kurt, Gruskiewicz Mike,
(1995), "Riciclo di termoindurenti in un mercato competitivo", *Macplas*, n. 173, nov., pp. 127-128.
Cassittò Lorenzo, Rizzi Antonio,
(1995), "Impianti di recupero energia", *Seleplast*, n. 11, nov., pp. 34-48.
Cattaneo Massimo,
(1995), *Tecnologie di recupero. Tecniche meccaniche e chimiche per il riciclo dei polimeri*, documento interno STP Tecnopolimeri Spa, Ceriano Laghetto (MI).
Di Diego Domenico,
(1995), "Riciclare si, ma con giudizio", *Interplastics*, mag.-giu., pp. 86-90.
Fechiplast,
(1995), *Guide to the Belgian Plastics Recycling Industry*, Bruxelles.

Fuchs S., et alii,
(1995), "Reprocessing of Mixed Plastics", *Kunststoffe plaste europe*, n. 1, gen., pp. 22-23.
Gebauer Manfred,
(1995[1]), "Rohstoffliches Recycling von Altkunststoffen", *Kunststoffe 85*, n. 2, feb., pp. 214-223.
Gebauer Manfred,
(1995[2]), "K-Abfalle: Spezifische Problematik - aktuelle Situation - Perspektiven", *Kunststoffberater*, n. 7-8, lug.-ago., pp. 48-51.
GE Plastics,
(1995[1]), *Pannelli per tetti in Noryl e test europei*, Press Information, AdMil Industria, Milano.
Herren Sigrid, et alii,
(1995), "Verbesserte Eigenschaften der Reststoffe durch Additive",
Kunststoffberater, n. 3, mar., pp. 26-35.
Inverardi Manlio,
(1995), *RDF un intelligente combustibile ausiliario nella produzione del cemento*, relazione al convegno AIM "Recupero di energia e di materia da plastiche post-consumo", 20 giu. 1995, Milano.
La Mantia Francesco Paolo (a cura di),
(1995[6]), *Il riciclo di materie plastiche*, Assorimap, Milano.
La Mantia Francesco Paolo,
(1995[7]), *Problems and Perspectives in Plastics Recycling*, relazione al convegno "Replastico", feb., 1995.
Lansu Emil,
(1995), *La divisione Materie plastiche come patner dell'industria delle materie plastiche in tutto il mondo*, conferenza stampa Bayer,
23 ago., Milano.
Leaversuch D. Robert,
(1995), "PPO Roofing Offers Weight and Cost Savings", *Modern Plastics International*, mar., pp. 37 -38.
Leghissa Sabino,
(1995), "Il riciclo di manufatti in compositi", *Seleplast*, n. 4, apr., pp. 44-47.
Malavasi Vilmo,
(1995), "Perdita di caratteristiche nel riciclo di tecnopolimeri", *Macplas*, n. 164, gen., p. 48.

Marino Bruno,
(1995), *Ricerca ed analisi di prodotti economici e validi da proporre alle amministrazioni ed agli enti pubblici nazionali, regionali e locali in vista dell'applicazione dell'articolo 9-quater comma 15 della legge 475/88*, R.Eco.Plast, Montemurlo (FI).
Pacini Luigi,
(1995[1]), "Materia prima secondaria dai teloni agricoli", *Seleplast*, n. 9, pp. 8-14.
Pacini Luigi,
(1995[2]), "Recupero e riciclo dei teloni agricoli in materia plastica", *Seleplast*, n. 12, dic., pp. 28-29.
Piana Marco,
(1995), "Pvc: come 'progettare' il riutilizzo", *Nuova Finestra*, lug.-ago, pp. 167-168.
Previero Dario,
(1995), "Riciclo efficiente di bottiglie e film agricolo", *Macplas*, n. 170, lug.-ago., pp. 33-34.
Stabilobloc,
(1995), *Utilisation du Stabilobloc en remblai routier. Proprietes mecaniques et physiques, documentazione tecnica*, Herstal, Belgio.
Rebeiz S. Karim,
(1995), "High-Performance Polyester Concrete Using Recycled PET", *Plastics in Building Construction*, n. 7, lug., pp. 8-12.
Seeliger Ursula,
(1995), *Biodegradable Polymer Materials*, Press-Information, Bayer, Milano.
Schut H. Jan,
(1995[1]), "New Alchemy for PET Arrives", *Plastic World*, n. 8, ago., pp. 27-28.
Schut H. Jan,
(1995[2]), "Additives Add Oomph to PCR (Post-Consumer Recycled) Parts", *Plastic World*, n. 8, ago., pp. 29-35.
Sulliavan P. Daniel,
(1995), "U.K. Targets Composite Recycling", *Plastic World*, n. 8, ago., p. 22.
Valente T., et alii,
(1995), "Trattamento di compositi a matrice termoindurente alla fine del ciclo di vita", *Macplas*, n. 171, set., pp. 182-184.
Zundorf Uwe, Porten Dieter,
(1995), "Cambio generazionale", *Seleplast*, n. 9, set., pp. 16-18.

AA.VV.,
(1996[1]), *Revive Sistem. Sistema per la valorizzazione di rifiuti plastici misti*, Commissione delle Comunità Europee DG XIII/D3, Lussemburgo.
APME,
(1996), *European Index of Key Plastics Recycling Schemes*, Federchimica, Milano.
*Associazione dei produttori di materie plastiche in Europa
Coges,
(1996), *Esempi di applicazione di semilavorati in plastica eterogenea riciclata*, documentazione tecnica, S. Gervasio Bresciano (BS).
Di Carlo Salvatore,
(1996), *La Fiat per il riciclo delle auto. Il F.A.RE.*,relazione tecnica, Torino
GE Plastics,
(1996), *Ethos*, documentazione tecnica, Cinisello Balsamo (MI).
Greiner,
(1996), *La parete fono-assorbente Greiner 93*, brochure illustrativa, Wartberg, Germania.
La Cirignola Angela,
(1996), *Materie plastiche*, Borsa di studio CNR ICITE, Sesto Ulteriano.
La Mantia Francesco Paolo,
(1996), *Il ruolo degli additivi nel riciclo delle materie plastiche*, documento interno, Dipartimento di Ingegneria Chimica dei Processi e dei Materiali, Università di Palermo.
Pfaendner R., et alii,
(1996), "Increasing the Service Life of Mouldings Containing Recyclate", *Kunststoffe plast europe*, n. 1, gen., pp.24-25.
PVC Information Council,
(1996), *PVC Recycling in Europe*, bollettino informativo, Bruxelles.
RecPlast,
(1996), *Packaging: è l'ora del riciclo*, documentazione tecnica, Piacenza.
RPE,
(1996), *Riciclo Plastiche Eterogenee*, documentazione tecnica, Parma.
Stabilobloc,
(1996[1]), *La Solution pour un Monde plus Stable*, documentazione tecnica, Herstal, Belgio.

Stabilobloc,
(1996[2]), *On the Way to a more Stable World*, documentazione tecnica, Herstal, Belgio.
Timbron,
(1996[1]), *Timbron Classic Test Results*, documentazione tecnica, Birmingham, United Kingdom.
Timbron,
(1996[2]), *Man Made Timber for Building Products*, documentazione tecnica, Birmingham, United Kingdom.
Wenguang M., La Mantia F. P.,
(1996), "Processing and Mechanical Properties of Recycled PVC and of Homopolymer Blends with Virgin PVC", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 59, pp. 759-767.
Vredestein Rubber Recycling,
(1996), *Vredestein Rubber Recycling Keeps the World Moving*, bollettino informativo, Maastricht.
Zeon Kasei,
(1996), *Givoku. Recycled Plastic Log & Board*, brochure illustrativa, Tokio, Giappone.

Sugli aspetti legislativi e ambientali del riciclo di materie plastiche

Wetzel Jean-Paul,
(1987), "One-Way Packaging in Switzerland,*Swiss Plastics*, n. 10, set., pp. 26-32.
AIM*,
(1990), *Le materie plastiche e l'ambiente*, Grafis Edizioni, Bologna.
*Associazione Italiana di Scienza e Tecnologia delle Macromolecole
CIBA-GEIGY Divisione Additivi,
(1992), *Gestione dei rifiuti di materie plastiche*, Bologna.
Pinetti Lucio,
(1993), *Legislazione italiana*, relazione al convegno "Imballaggi e rifiuti da imballaggi. Legislazione comunitaria e normative nazionali a confronto, Milano, 17 dic. 1993.
Beretta Claudia Anna,
(1994), *Ipotesi normative per le materie plastiche riciclate*, relazione al convegno AIM "Sviluppi e tendenze del riciclo di materie plastiche", Milano 3 mag. 1994.

Bras Alessandra,
(1994), "Commento al Decreto Legge sui residui recuperabili", *Newsletter*, n. 2, dic., pp. 4-5.

Manzini Ezio,
(1994[2]), "Verso una nuova identità dei materiali polimerici?", *Macplas*, n. 161, set., pp. 61-62.

Morace Francesco,
(1994), "Plastica nell'immaginario di consumo", *Macplas*, n. 161, set., pp. 59-61.

Pinetti Lucio,
(1994[1]), *Legislazione e quadro economico del riciclo di polimeri in Europa*, relazione al convegno "Plastics Material Recycling", Palermo 22-24 set. 1994.

AA.VV.,
(1995[2]), "Just what Is the Justification for Recycling?", *British Plastics & Rubber*, n. 2, feb., pp. 4-6.

APME*,
(1995[4]), *Plastics recovery in Perspective*, Federchimica, Milano.
*Associazione dei produttori di materie plastiche in Europa

Bayer,
(1995[2]), *Consigli per il riciclaggio e il design nel settore della progettazione e della produzione*, Press-Information, lug. 1995, Milano.

Callegaro Paolo,
(1995), *Sottocommissione 25 Uniplast: materie plastiche di riciclo*, relazione al convegno "Materie plastiche di riciclo: sviluppi nell'attività di normazione ed evoluzione legislativa", Milano, 5 dic. 1995.

Capria Antonella,
(1995), *I cambiamenti indotti dalla nuova direttiva sugli imballaggi*, relazione al convegno "Problematiche ambientali e materie plastiche nell'imballaggio e confezionamento", CESAP, Zingonia (BG), 20 apr. 1995.

Lamperti Mario,
(1995[1]), *Esigenze di normazione per le materie plastiche di riciclo*, relazione al convegno "Materie plastiche di riciclo: sviluppi nell'attività di normazione ed evoluzione legislativa", Milano, 5 dic. 1995.

Lamperti Mario,
(1995[2]), *Progetti di norma sulle materie plastiche di riciclo*, relazione al convegno "Materie plastiche di riciclo: sviluppi nell'attività di normazione ed evoluzione legislativa", Milano, 5 dic. 1995.

Leaversuch D. Robert,
(1995), *Cradle-to-Grave Environmental Assessments Favor Plastics' Use in Many Markets*, Modern Plastics International, n. 9, ago., pp. 50-51.

Pinetti Lucio (a cura di),
(1995[4]), *Il riciclo di materie plastiche in Italia.Verso nuovi orizzonti*, Censimento dei riciclatori italiani 1994 a cura della Assorimap, Milano.

Rettani Roberto,
(1995) "Una soluzione reale all'emergenza rifiuti", *Seleplast*, n. 1, gen., pp. 20-29.

Russotto Nancy,
(1995), "Il valore delle risorse sprecate", *Seleplast*, n. 12, dic., pp. 24-25.

Venosta Corrado,
(1995), *Certificazione delle materie plastiche di riciclo*, relazione al convegno "Materie plastiche di riciclo: sviluppi nell'attività di normazione ed evoluzione legislativa", Milano, 5 dic. 1995.

Unionplast,
(1995[1]), *1945 - 1995. Cinquantenario Unionplast*, relazione della Giunta all'assemblea generale, Milano, 16 giu. 1995.

Unionplast,
(1995[2]), *Direttiva "Packaging and Packaging Waste". Le linee guida e gli aspetti del recepimento nell'ordinamento giuridico italiano*, Milano, 30 gen 1995.

AA.VV.,
(1996[2]), "Nel paese delle 700 leggi", *Corriere Lavoro - Corriere della Sera*, 26 gen. 1996, p. 11.

Sulla progettazione con le materie plastiche

Hoechst Italia S.p.A.,
(1979[1]), *Materie plastiche per uso tecnico. Basi di calcolo, dati caratteristici, esempi di calcolo*, manuale tecnico, Milano.

Hoechst Italia S.p.A.,
(1979[2]), *Materie plastiche per uso tecnico. Calcolo per assemblaggio mediante forzatura*, manuale tecnico, Milano.

Scheichenbauer Mario,
(1979), *Lavorazione dei termoplasti. La termoformatura*, Angeli, Milano.
Beck D. Ronald,
(1980), *Plastic Product Design*, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 2ª ed.
Bertacchi Giorgio,
(1980), *Tecnoplastici. Fondamenti di calcolo per manufatt stampati. Introduzione al calcolo*, Metalmeccanica Plast, Milano.
Hoechst Italia S.p.A.,
(1980), *Materie plastiche per uso tecnico.Saldatura a ultrasuoni di materie plastiche per uso tecnico*, manuale tecnico, Milano.
Scheichenbauer Mario,
(1982), *Progettare con il poliestere rinforzato*, ITEC Editrice, Milano, 2ª ed.
Dym Joseph,
(1983), *Product Design with Plastics*, Industrial Press, New York.
Hoechst Italia S.p.A.,
(1986), *Materie plastiche per uso tecnico. Progettazione di manufatti con materie plastiche tecniche*, manuale tecnico,
Milano.
Satas Donatas,
(1986), *Plastics Finishing and Decoration*, Van Nostrand Reinhold Company, New York.
Hoechst Italia S.p.A.,
(1987), *Technical Plastics. Outsert moulding with Hostaform*, manuale tecnico, Milano.
Oberbach K., Muller W.,
(1987), *Prove su manufatti in materiale plastico*, Tecniche Nuove, Milano.
Romanelli Francesco,
(1987), Tramezzi in plastica, Liguori Editore, Napoli.
GE Plastics,
(1989), *The New Engineering*, manuale tecnico, Cinisello
Balsamo
(MI).
GE Plastics,
(1989), *Guida alla progettazione funzionale ed economica*, manuale tecnico, Cinisello Balsamo (MI).
AA.VV.,
(1990), "Progettare il ricupero", *CSI notizie*, n. 3, dic., p. 8.

Dupont,
(1990), *Design Handbook*, manuale tecnico, Cologno Monzese (MI).
Dupont,
(1990), *Designing for Cost-effective cookers and ranges*, manuale tecnico, Cologno Monzese (MI).
Addeo Antonio,
(1992), *Materiali pluriprestazionali per componenti omomateriali*, relazione al corso di aggiornamento "Design Ecologico. Fare, disfare, riciclare", Politecnico di Milano, Facoltà di Architettura, 22-26 giu. 1992.
Rao S. Natti,
(1992), *Materie plastiche. Le formule*, Tecniche Nuove, Milano.
Fiocca Alberto,
(1993), *Riciclo*, relazione al convegno "TMP", Saronno, 7 ott. 1993.
Addeo Antonio,
(1994), *The Environmental Problem and Material, Process and Product Innovation*, relazione al seminario "Scenarios of Sustainability", Milano, 28-29 apr. 1994.
GE Plastics,
(1994), *Guida ai principi di progettazione con i tecnopolimeri*, manuale tecnico, Cinisello Balsamo (MI).
American Plastics Council,
(1994), *Designing for the Environment*, guida tecnica.
GE Plastics,
(1996), *Design Guide*, manuale tecnico, Cinisello Balsamo (MI).

Sulla questione della costruzione sostenibile

Bateson Gregory,
(1972), *Steps to an Ecology of Mind*, Chandler & Sharps, Novato (California), (tr. it. di Giuseppe Longo, *Verso un'ecologia della mente*, Adelphi, Milano, 1976).
Meadows D. H., et alii,
(1972), *The Limit to Growth*, The Club of Rome, Ginevra, (tr. it., *I limiti dello sviluppo*, Mondadori, Milano, 1972.).
Bateson Gregory,
(1979), *Mind and Nature. A Necessary Unity*, Dutton, New York, (tr. it. di Giuseppe Longo, *Mente e natura*, Adelphi, Milano, 1984).
IUCN*,
(1980), *World Conservation Strategy*, Gland, Switzerland.
*International Union for the Conservation of Nature and Natural Resources

Capra Fritjof,
(1982), *The Turning Point. Science, Society, and the Rising Culture*, Simon and Schuster, New York, (tr. it. di Libero Sosio, *Il punto di svolta. Scienza, società e cultura emergente*, Feltrinelli, Milano, 1986, 2[a] ed.).
Paiella Maria Luisa,
(1992-93), Tesi di Laurea, *La valutazione dei prodotti da costruzione attraverso il sistema di etichettatura ecologica*, relatore
Silvia Piardi, correlatore Andrea Ratti, Politecnico di Milano, Facoltà di Architettura.
Rubin S. Edward, et alii,
(1992), "Realistic Mitigation Options for Global Warming", *Science*,
n.257, lug., pp.148-149 e pp. 261-267.
APME*, PWMI**,
(1993), *Valutare il bilancio ambientale*, Federchimica, Milano.
*Associazione dei produttori di materie plastiche in Europa
**Centro Europeo per le plastiche nell'ambiente
BCSD*,
(1993), *Eco-efficency Workshop*, ciclostilato, nov. 1993.
*Business Council for Sustainable Development
Carrubba Corrado,
(1993), "L'Ecolabel in breve", *Dossier ambiente*, n. 22, lug., p. 57.
ICI Polyurethanes Group,
(1993), *Life-Cycle Analysis. Assensing the Environmental Impact of Polyurethanes*, pubblicazione illustrativa, Everberg, Belgio.
Morfini Luisa,
(1993[2]), "Nascita, ascesa e morte di un prodotto", *Modulo*, n. 190, apr., pp. 300-304.
Nironi Laura,
(1993-94), Tesi di laurea, *L'analisi del ciclo di vita e le tecnologie edilizie. Uno strumento di supporto alle scelte di progetto sui materiali e sul loro assemblaggio*, relatore Guido Nardi, correlatori Claudio Cerruti e Luisa Morfini, Politecnico di Milano, Facoltà di Architettura.
Bianchi Duccio,
(1994), Analisi del ciclo di vita dei prodotti, relazione al corso COMETT, "Analisi del ciclo di vita dei prodotti ed ecobilanci aziendali", Milano, 7-8-9 giu. 1994.

Hansen H. Kim,
(1994), *Understanding Ecological Changes in the Danish Building Tradition*, relazione al convegno "Sustainable Construction", Tampa (Florida, USA), 6-9 nov. 1994.

Hill C. Richard, Bergman G. Jan, Bowen A. Paul,
(1994), *A Framework for the Attainment of Sustanaible Construction*, relazione al convegno "Sustainable Construction", Tampa (Florida, USA), 6-9 nov. 1994.

Kibert J. Charles,
(1994[1]), *Establishing Principles and a Model for Sustainable Construction*, relazione al convegno "Sustainable Construction", Tampa (Florida, USA), 6-9 nov. 1994.

Kibert J. Charles, et alii,
(1994[2]), *Sustainable Development and the Enviroment: U.S. & International Trends*, relazione al convegno "Sustainable Construction", Tampa (Florida, USA), 6-9 nov. 1994.

Liddle Brantley T.,
(1994), *Construction forSustainability and the Sustainability of the Construction Industry*, relazione al convegno "Sustainable Construction", Tampa (Florida, USA), 6-9 nov. 1994.

Manzini Ezio,
(1994[1]), *Progettare l'eco-efficienza. Dal re-design dell'esistente alla progettazione di strategie industriali / ambientali*, relazione al corso COMETT, "Analisi del ciclo di vita dei prodotti ed ecobilanci aziendali", Milano, 7-8-9 giu. 1994.

Manzini Ezio,
(1994[3]), *Eco-efficienza e analisi del ciclo di vita come strumento di progettazione*, relazione al corso COMETT, "Analisi del ciclo di vita dei prodotti ed ecobilanci aziendali", Milano, 7-8-9 giu. 1994.

Steele W. Matthew,
(1994), *Energy-Related Technologies: Five Technologies for Lower Energy Demand and Decreased Air Emissions*, Center for Construction Research and Education, Cambridge.

Wyatt P. David,
(1994), *Recycling and Serviceability: the Twin Approach to Securing Sustainable Construction*, relazione al convegno "Sustainable Construction", Tampa (Florida, USA), 6-9 nov. 1994.

Valle Luciano,
(1996), *Il dibattito sulla modernità*, conferenza tenuta il 12 gentile., presso il Politecnico di Milano, Facoltà di Architettura, annotazioni dell'autore.

ELENCO DELLE FIGURE

Capitolo 2

Capitolo 3

Capitolo 4

ELENCO DELLE TABELLE

ELENCO DELLE TAVOLE

Capitolo 4

Capitolo 5

Fig. 1 Catene molecolari termoplastiche
La figura mostra la configurazione delle catene macromolecolari indipendenti e intrecciate fra loro, tipica di un polimero termoplastico (GE Plastics, 1994, p. 11).

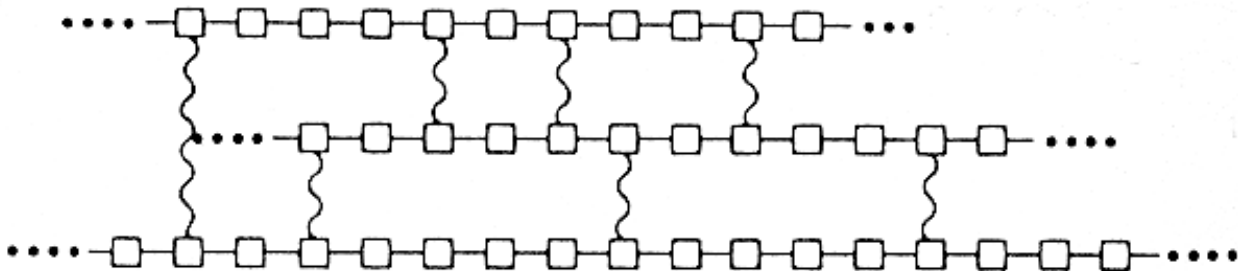



Fig. 2 Catene molecolari elastomeriche
La figura mostra la configurazione delle catene macromolecolari elastomeriche, caratterizzate da reticolazioni a maglie larghe tra macromolecole lineari (Saechtling, 1993, p. 4).

Fig. 3 Catene molecolari termoindurenti
La figura mostra la configurazione delle catene macromolecolari caratterizzata da legami atomici incrociati, tipica di un polimero termoindurente (GE Plastics, 1994, p. 11).

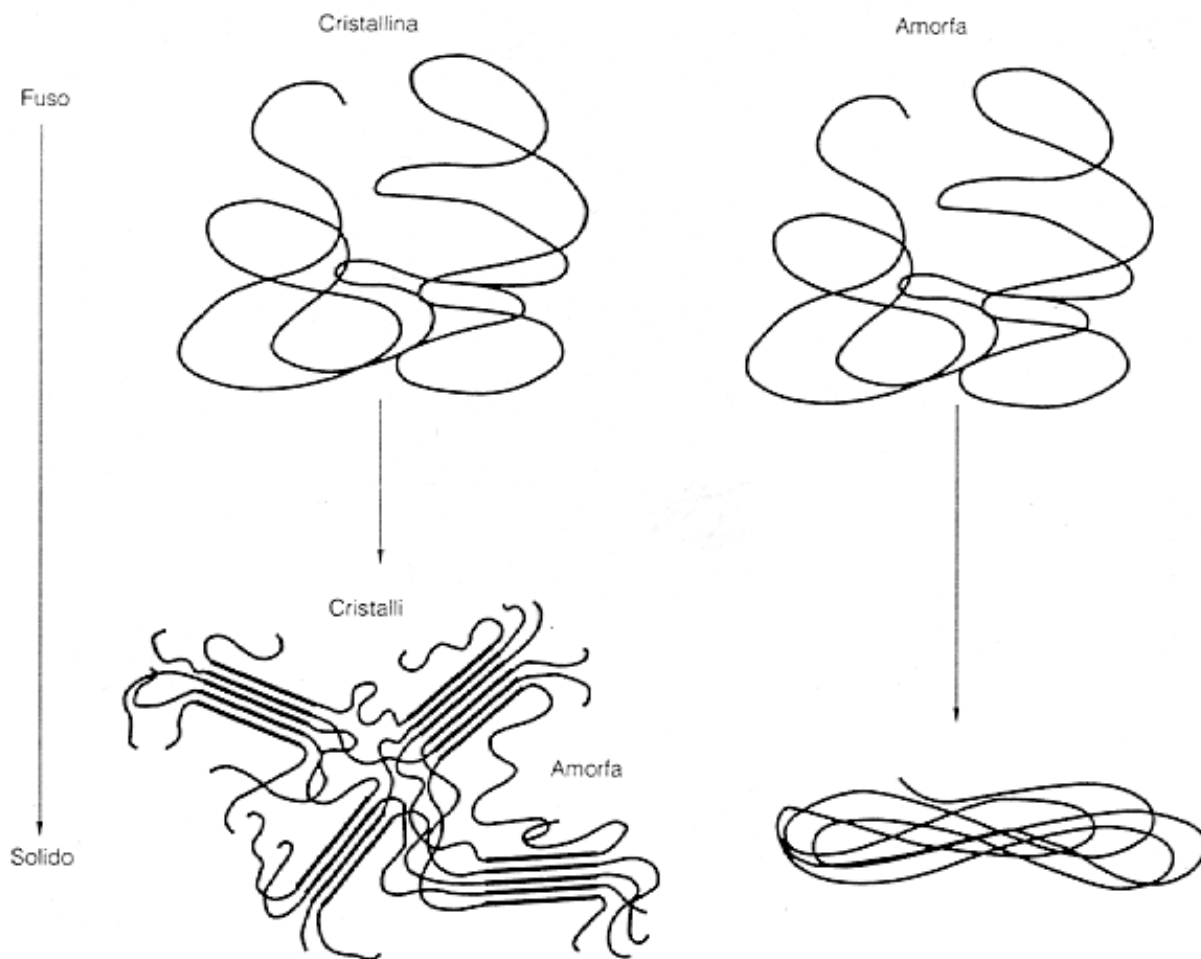



Fig. 4 Strutture molecolari cristalline e amorfe
La figura mostra la rapprentazione grafica delle strutture molecolari cristalline e amorfe: quando il polimero fuso si solidifica, nella struttura cristallina le catene macromolecolari assumono, in alcune parti, una posizione ordinata definendo dei cristalliti, mentre nella struttura amorfa le catene macromolecolari risultano raggomitolate tra di loro in modo disordinato (GE Plastics, 1994, p. 11).

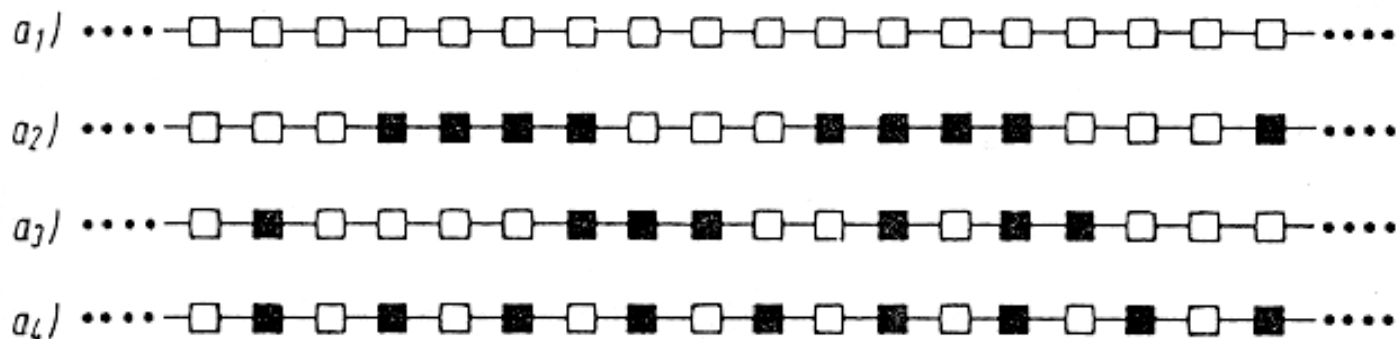
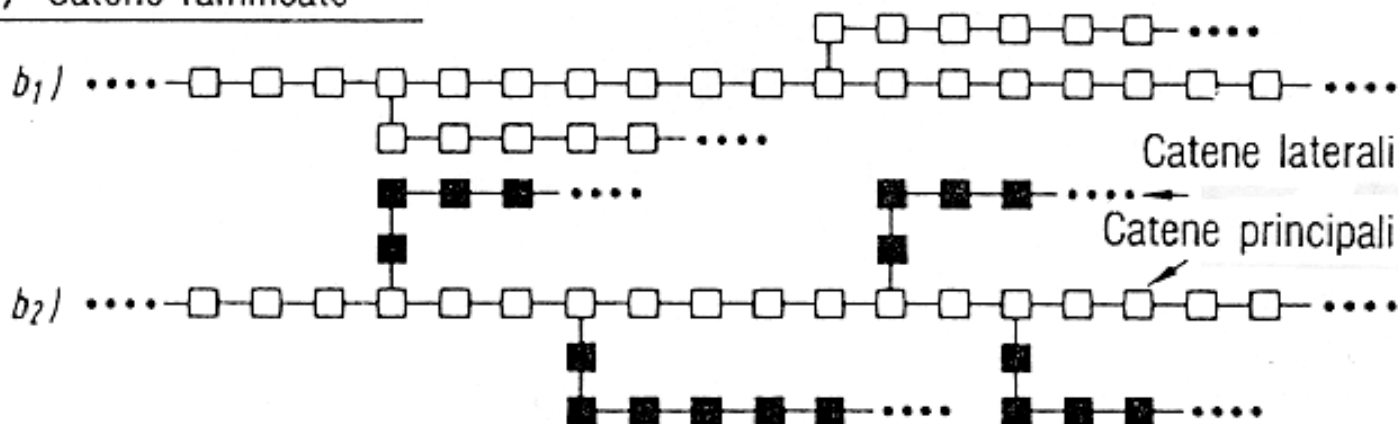



Fig. 5 Catene molecolari copolimeriche
La figura mostra la configurazione delle catene di alcune combinazioni a livello intramolecolare di termoplasti: i polimeri che possiedono un solo tipo di unità ricorrente (monomero) vengono definiti omopolimeri (Fig. 5.a_1); i polimeri che contengono due o più tipi di unità ricorrenti (monomeri), vengono definiti copolimero a blocchi (Fig. 5.a_2), copolimero “random” (Fig. 5.a_3), e copolimero alternato (Fig. 5.a_4); i polimeri che presentano catene molecolari ramificate e che si dividono in omopolimeri ramificati (Fig. 5.b_1), se caratterizzati da una singola unità monomerica, oppure copolimeri a innesto (Fig. 5.b_2), nel caso che alla catena principale vengano aggiunte catene laterali di monomeri diversi (Saechtling, 1993, p. 4).

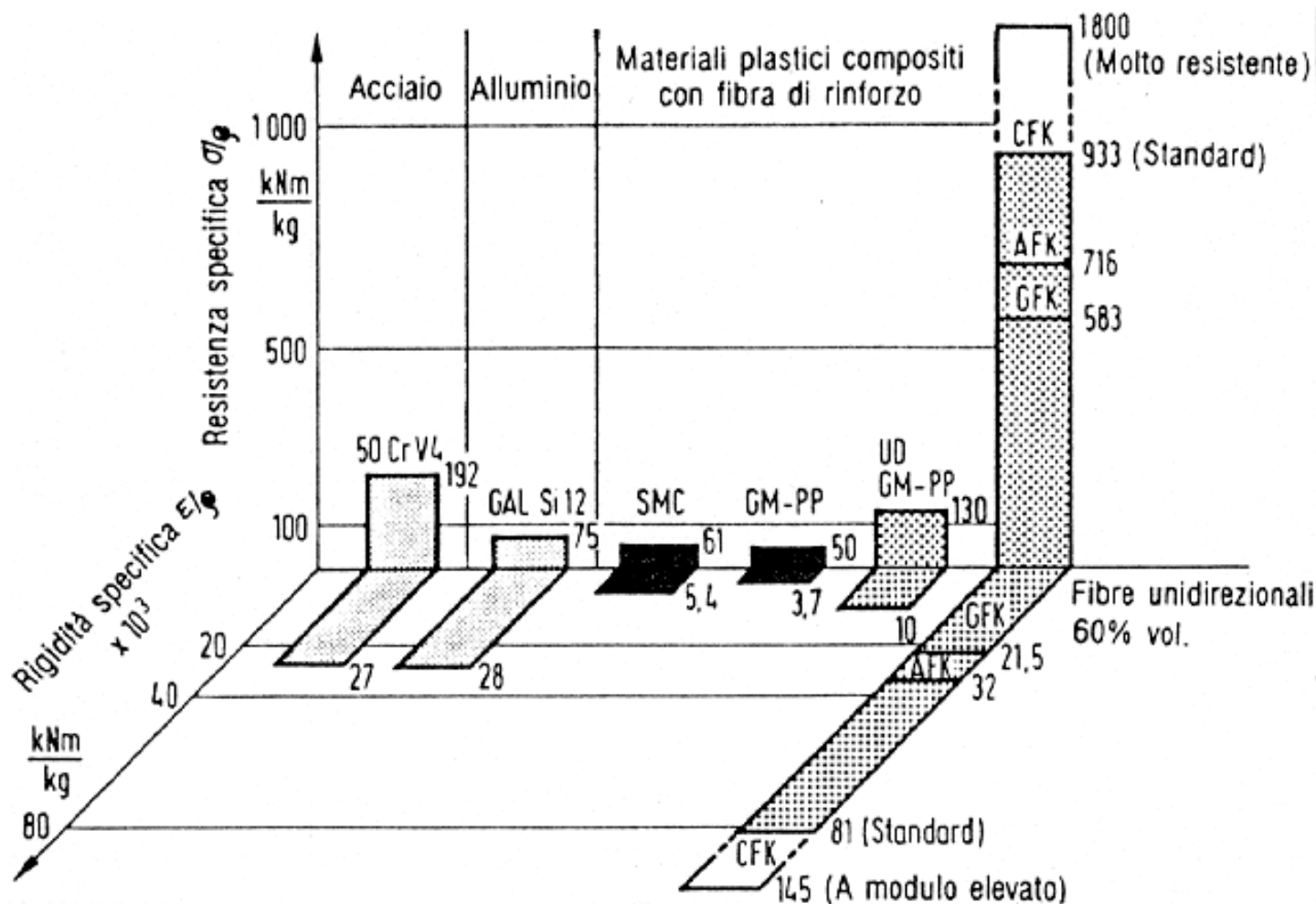



Fig. 6 Resistenza e rigidità specifica di polimeri fibro-rinforzati
La figura mostra la comparazione delle resistenze specifiche e delle rigidità specifiche di acciaio, alluminio e di materiali plastici compositi con fibra di rinforzo tra cui, in particolare, SMC (lastre preimpregnate con resine reattive rinforzate, “sheet moulding compound”), GM-PP e UDGM-PP (polipropilene rinforzato con fibre di vetro), CFK (materiale plastico rinforzato con fibre di carbonio), AFK (materiale plastico rinforzato con fibre aramidiche - kevlar), GFK (materiale plastico rinforzato con fibre di vetro) (Saechtling, 1993, p. 7).

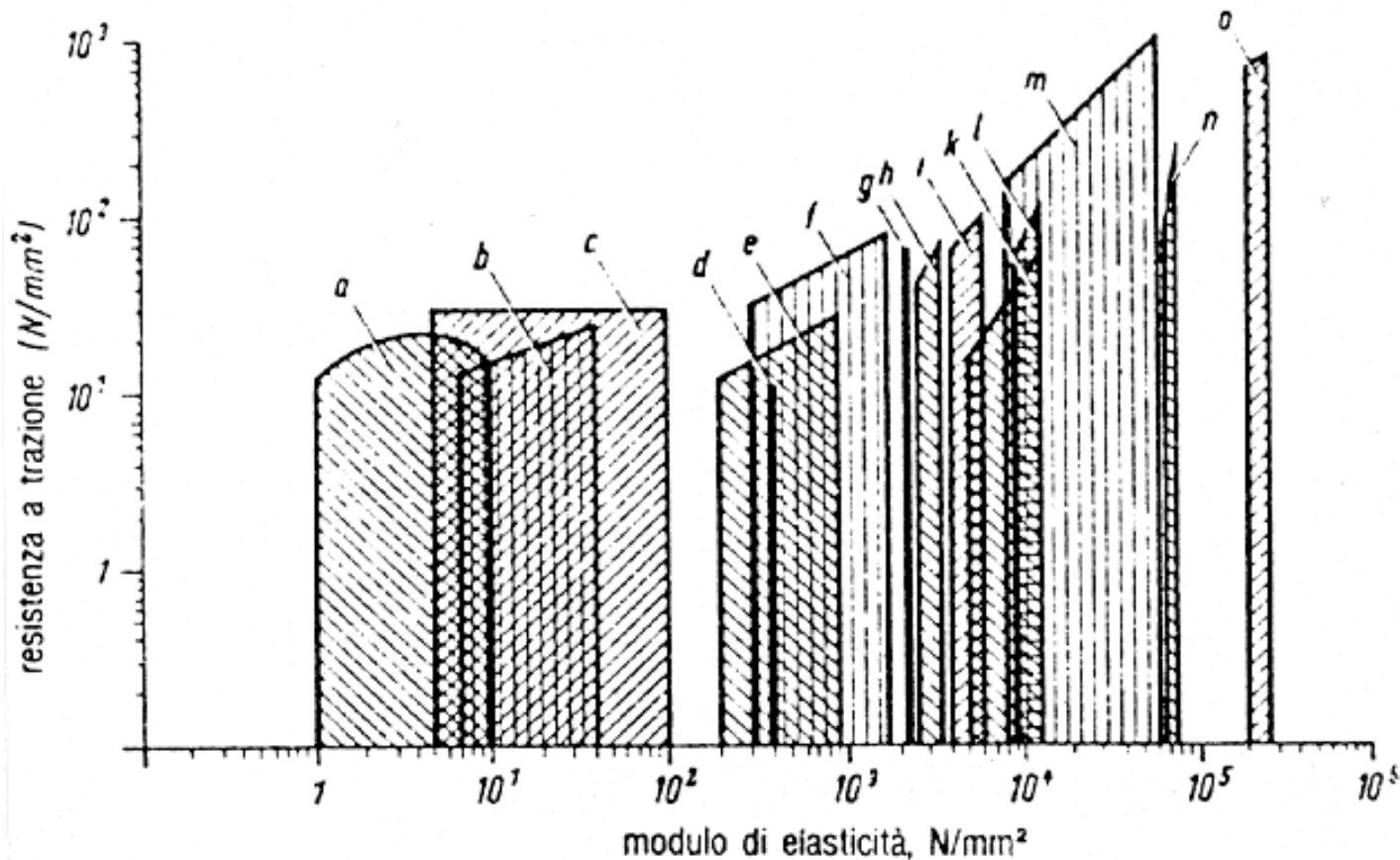



Fig. 7 Resistenza a trazione e modulo elastico delle materie plastiche
La figura mostra i valori di resistenza a trazione e modulo elastico di: a) gomma tenera, b) polivinilcloruro plastificato, c) elastomeri poliuretanici, d) politetrafluoro etilene, e) polietilene, f) poliammide, g) policarbonato, h) polistirene, polivinilcloruro rigido e vetro acrilico, k) materiale stampato e stratificato, l) laminati di carta e di tessuto, m) materie plastiche rinforzate con fibre di vetro, n) alluminio, o) acciaio (Saechtling, 1993, p. 14).

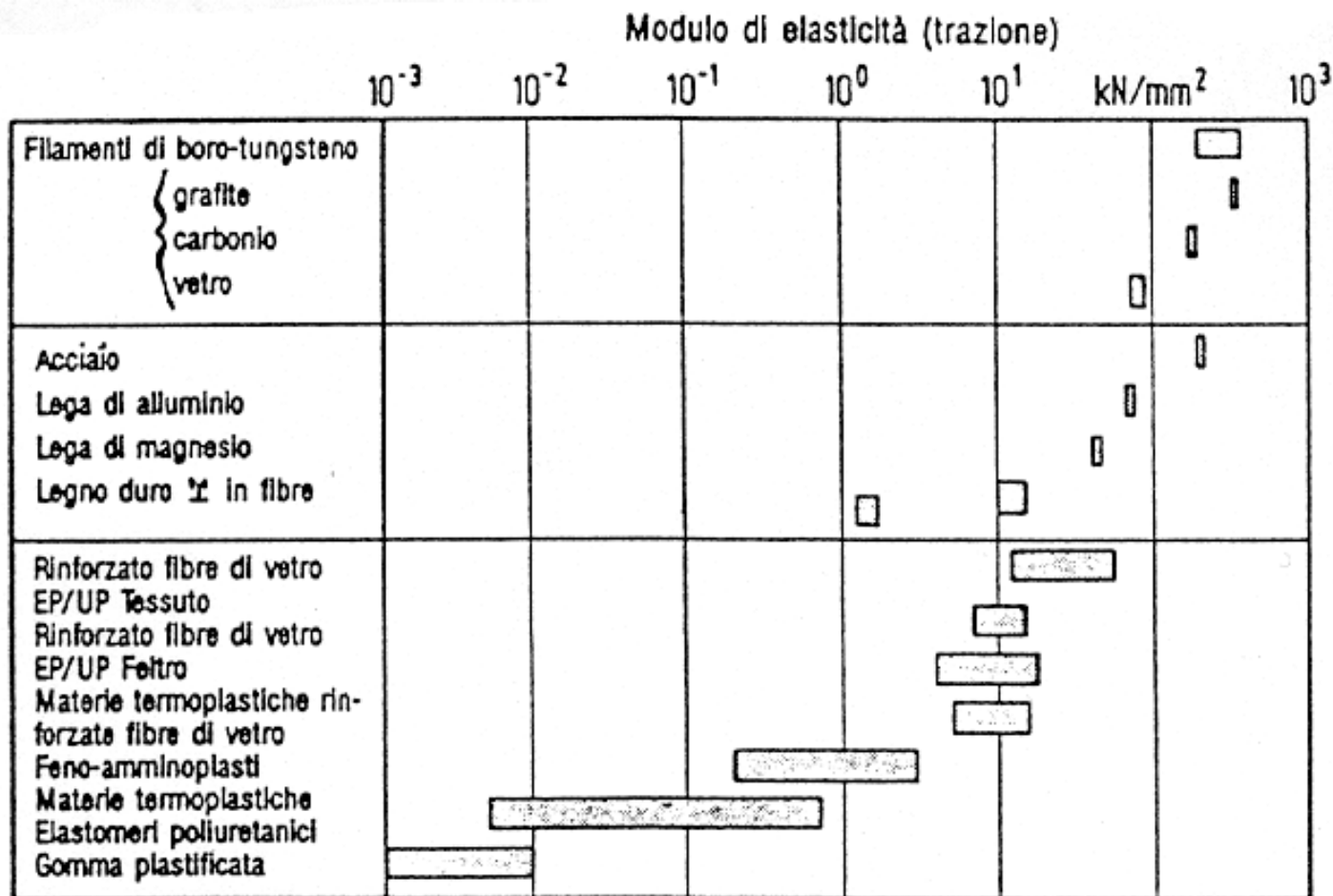



Fig. 8 Modulo elastico delle materie plastiche
La figura mostra l'ordine di grandezza dei moduli elastici delle principali famiglie di materie plastiche, confrontati con quelli di alcuni materiali da costruzione e alcuni materiali di rinforzo (Oberbach, Muller, 1987, p. 28).

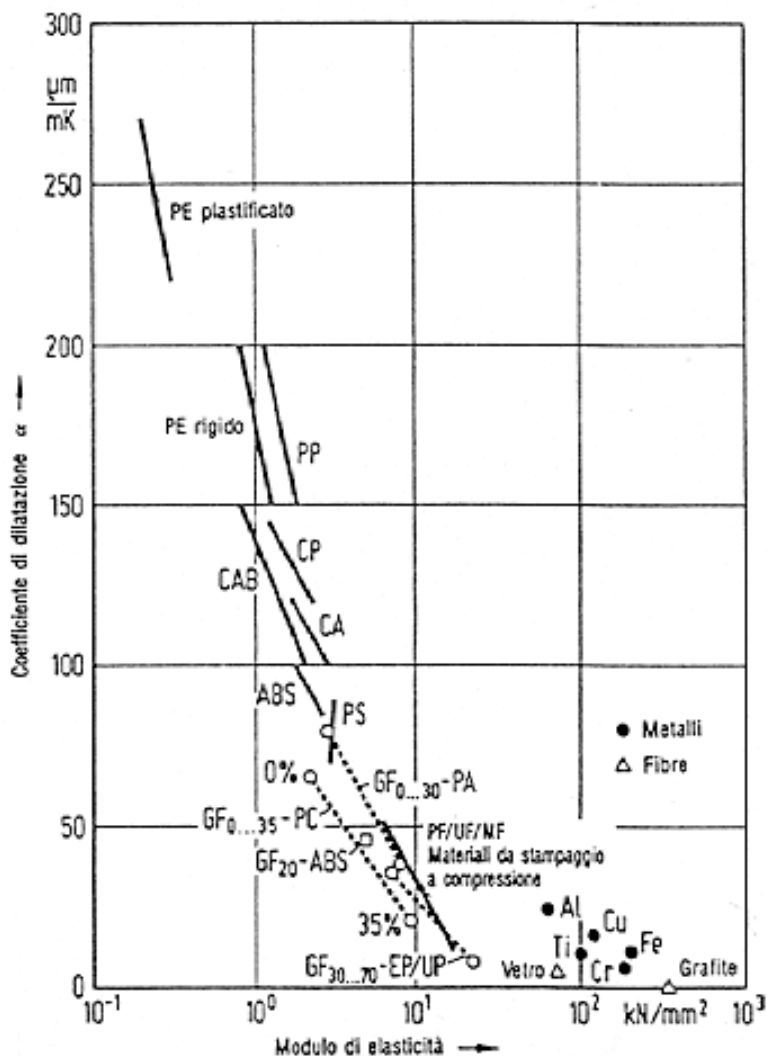



Fig. 9 Rapporto coefficiente di dilatazione termica / modulo elastico

La figura mostra la variazione del coefficiente di dilatazione termica a al variare del tipo di polimero e del modulo elastico (Oberbach, Muller, 1987, p. 75).

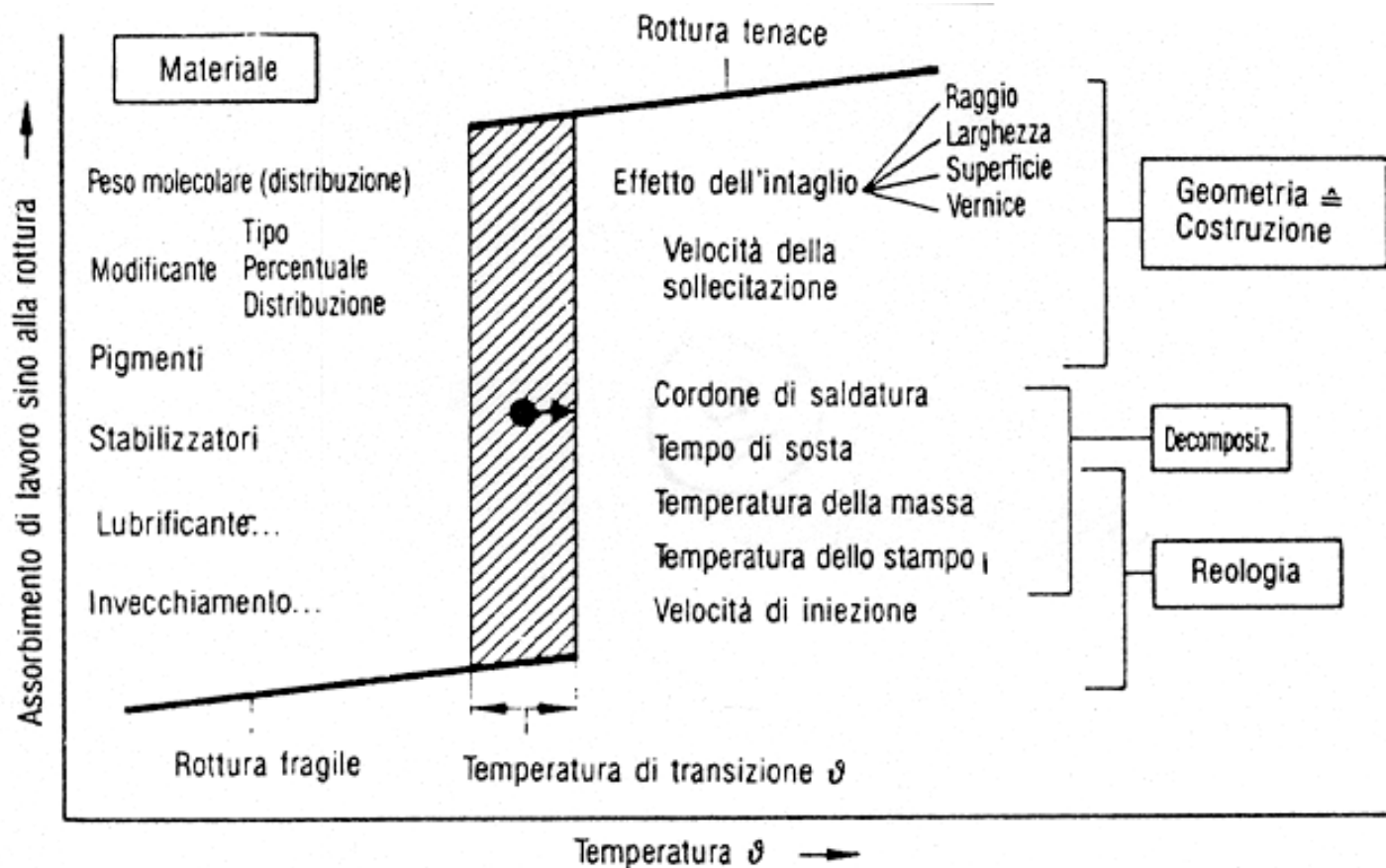



Fig. 10 Fattori d'influenza sulla temperatura di transizione
La figura mostra i fattori d'influenza sulla temperatura di transizione vetrosa nelle materie plastiche caratterizzate rispettivamente da una rottura di tipo tenace e di tipo fragile (Oberbach, Muller, 1987, p. 71).

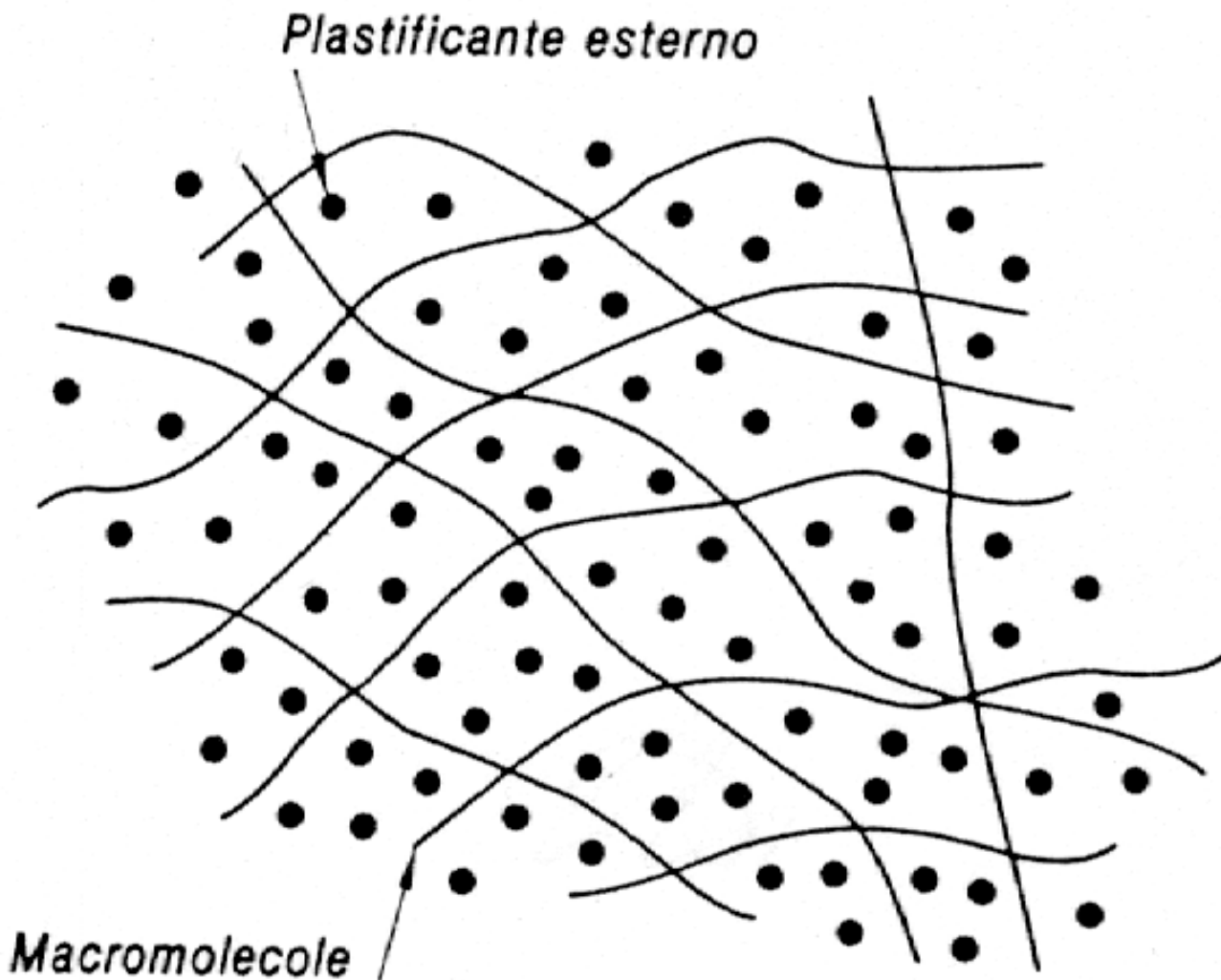



Fig. 11 Molecole di PVC con inserimento di plastificante
La figura mostra la rappresentazione grafica dell'azione degli additivi plastificanti, che si interpongono tra le catene molecolari formando dei cuscinetti che ne aumentano la resistenza agli urti (Hellerich, Harsch, Haenle, 1990, p. 19).

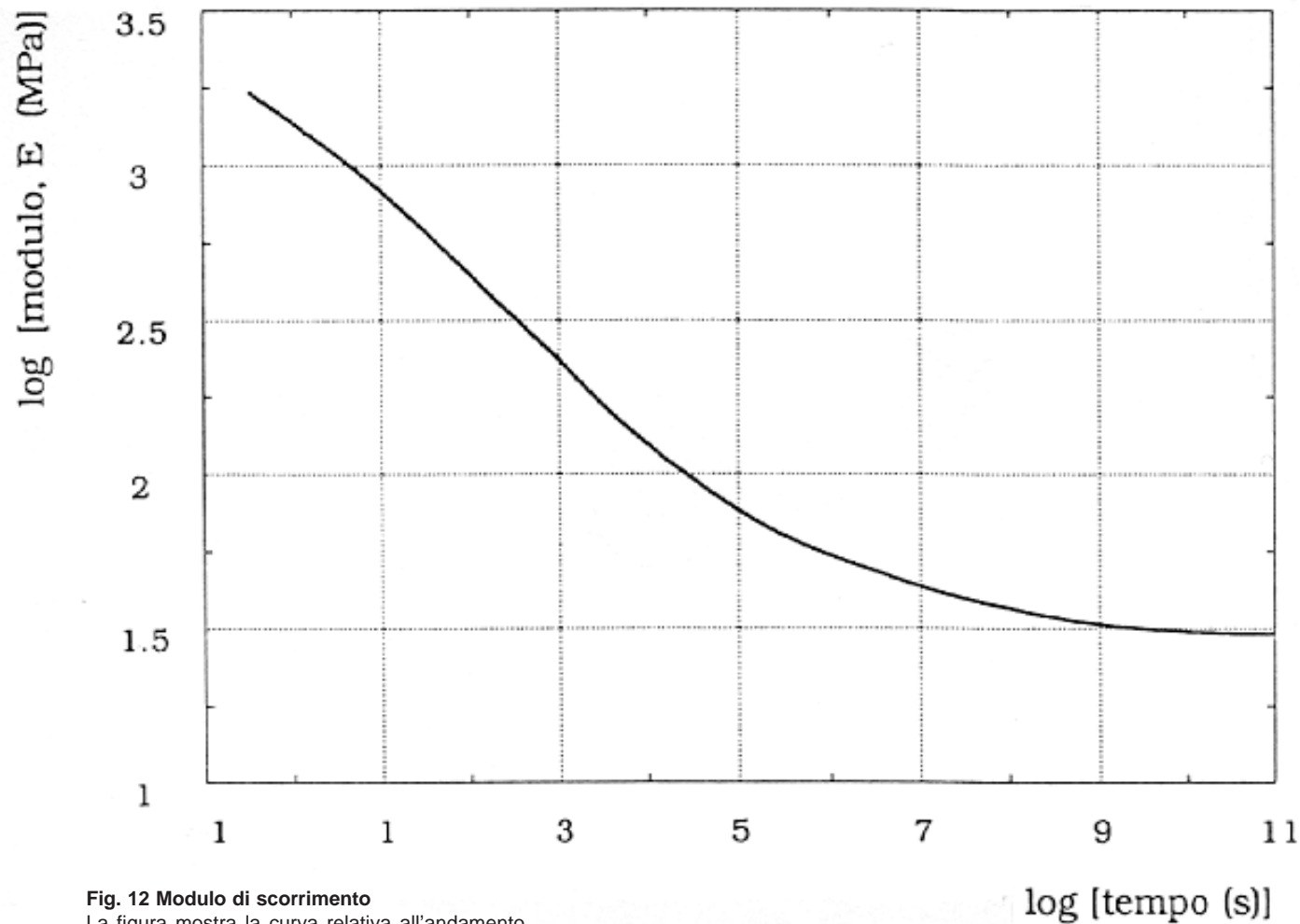



Fig. 12 Modulo di scorrimento
La figura mostra la curva relativa all’andamento del modulo elastico di un policarbonato (PC) misurato, a temperatura ambiente, in funzione del tempo (Celaschi, 1995, p. 75).

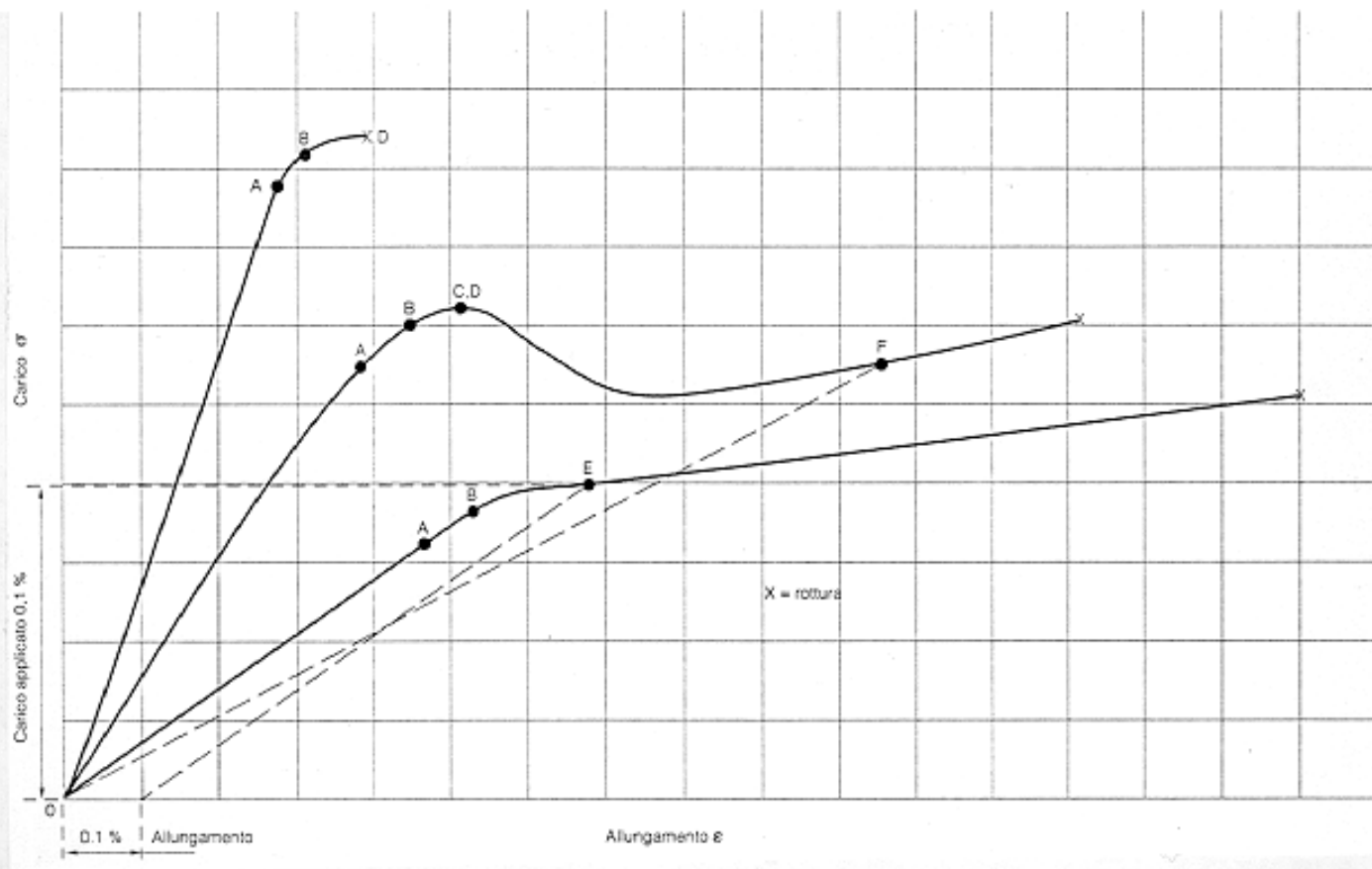



Fig. 13 Curve tipiche di carico / allungamento a breve termine
La figura mostra l'andamento di alcune curve relative al comportamento carico / allungamento a breve termine: si distinguono il limite di proporzionalità (a), il limite di elasticità (b), il punto di snervamento (c), il limite di resistenza (d), il limite elastico (e) (GE Plastics, 1994, p. 19).

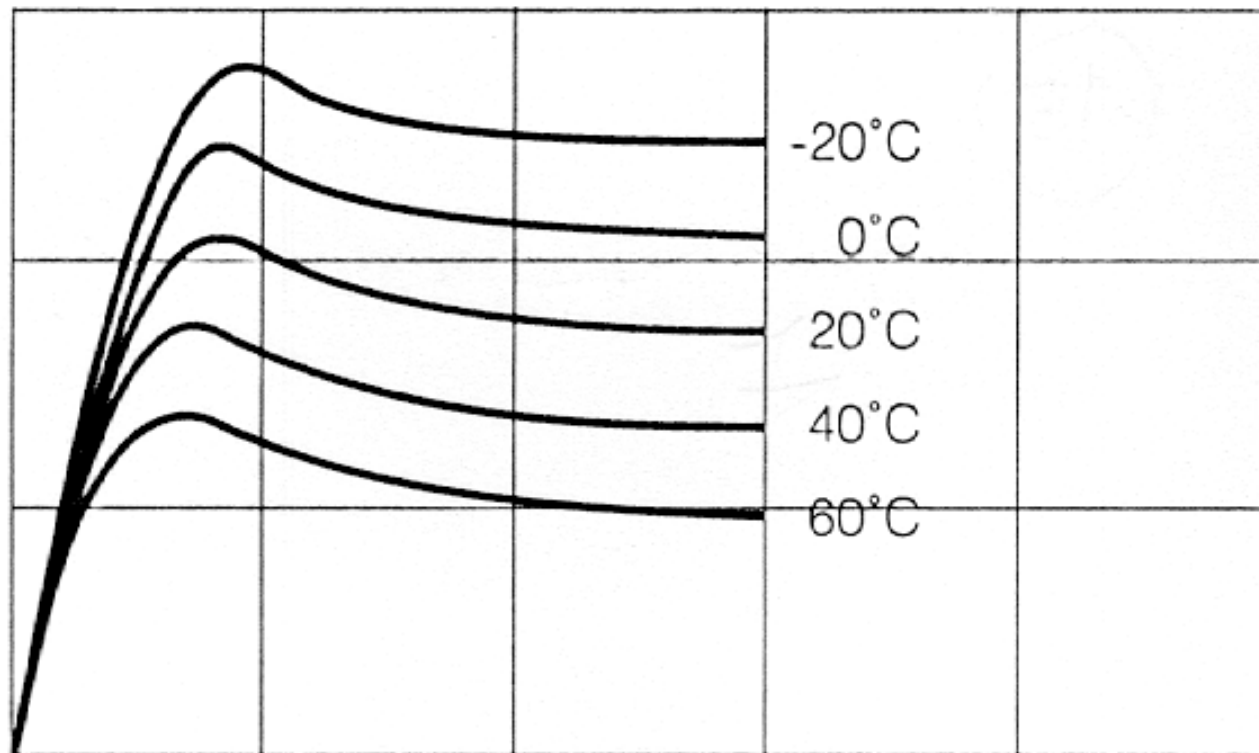



Fig. 14 Effetto della temperatura sul comportamento carico/ allungamento a breve termine
La figura mostra l'influenza della temperatura sul comportamento di carico / allungamento a breve termine nei polimeri, misurato a velocità di trazione costante (GE Plastics, 1994, p. 19).

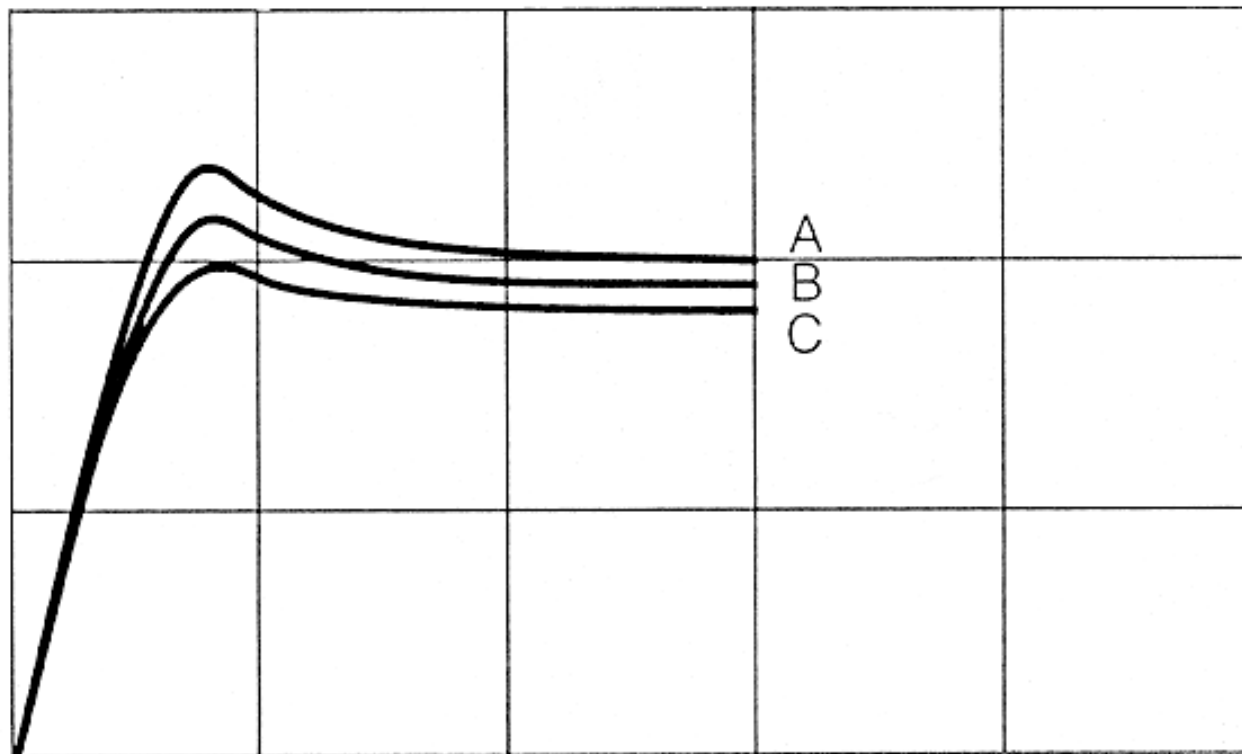



Fig. 15 Effetto della variazione di velocità di trazione sul comportamento carico / allungamento a breve termine
La figura mostra l’influenza della variazione di velocità di trazione sul comportamento di carico / allungamento a breve termine nei polimeri, misurato a temperatura costante per velocità iniziali pari a 2.5 % s^{-1} (A), 0.25 % s^{-1} (B), 0.025 % s^{-1} (C), (GE Plastics, 1994, p. 19).

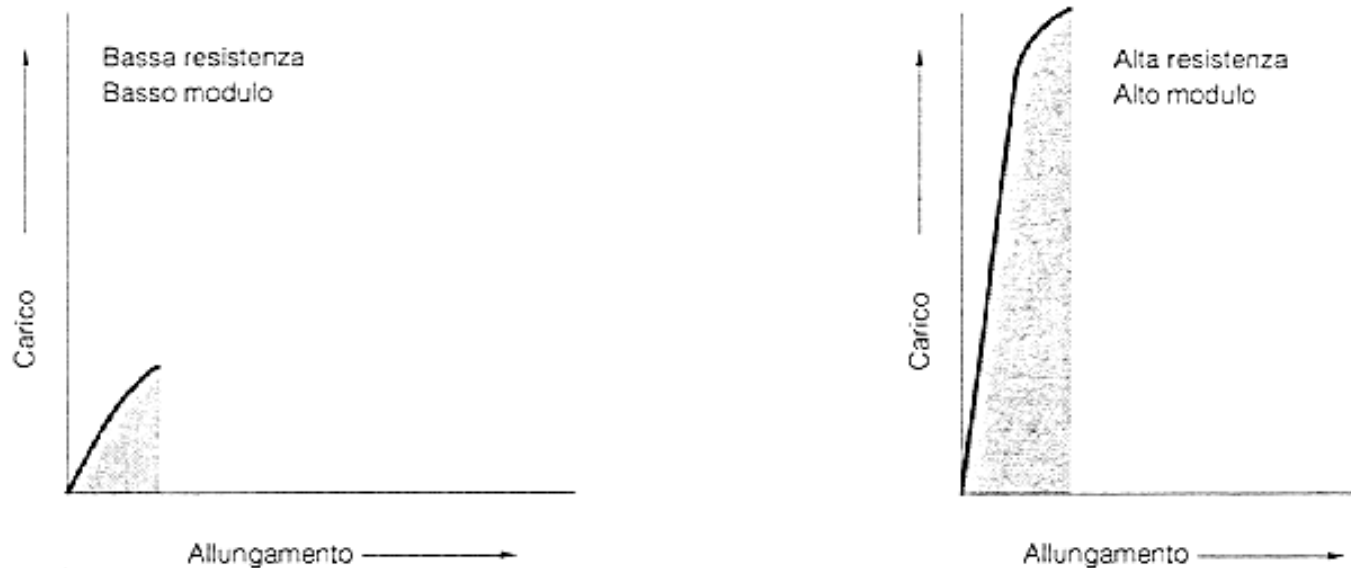



Fig. 16 Comportamento carico / allungamento a breve termine di materiali fragili
La figura mostra l'andamento delle curve relative al comportamento carico / allungamento di materiali fragili, comportamento che nei polimeri si riscontra a temperature basse o elevata velocità di trazione (GE Plastics, 1994, p. 13).

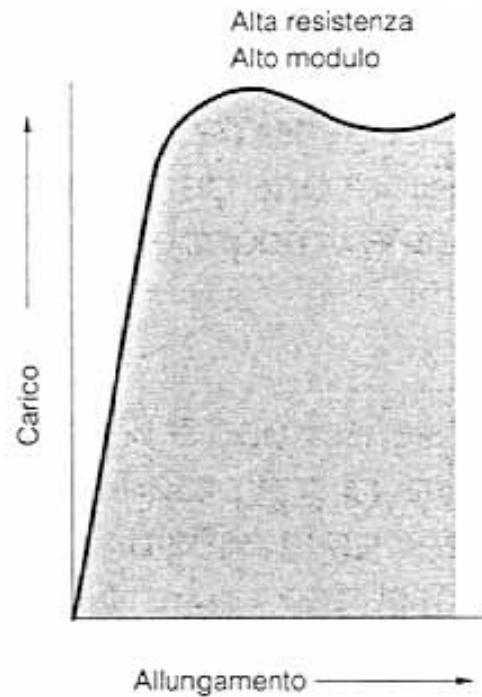



Fig. 17 Comportamento carico / allungamento a breve termine di materiali duttili
La figura mostra l'andamento delle curve relative al comportamento carico / allungamento di materiali duttili, comportamento che nei polimeri si riscontra a temperature elevate o bassa velocità di trazione (GE Plastics, 1994, p. 13).

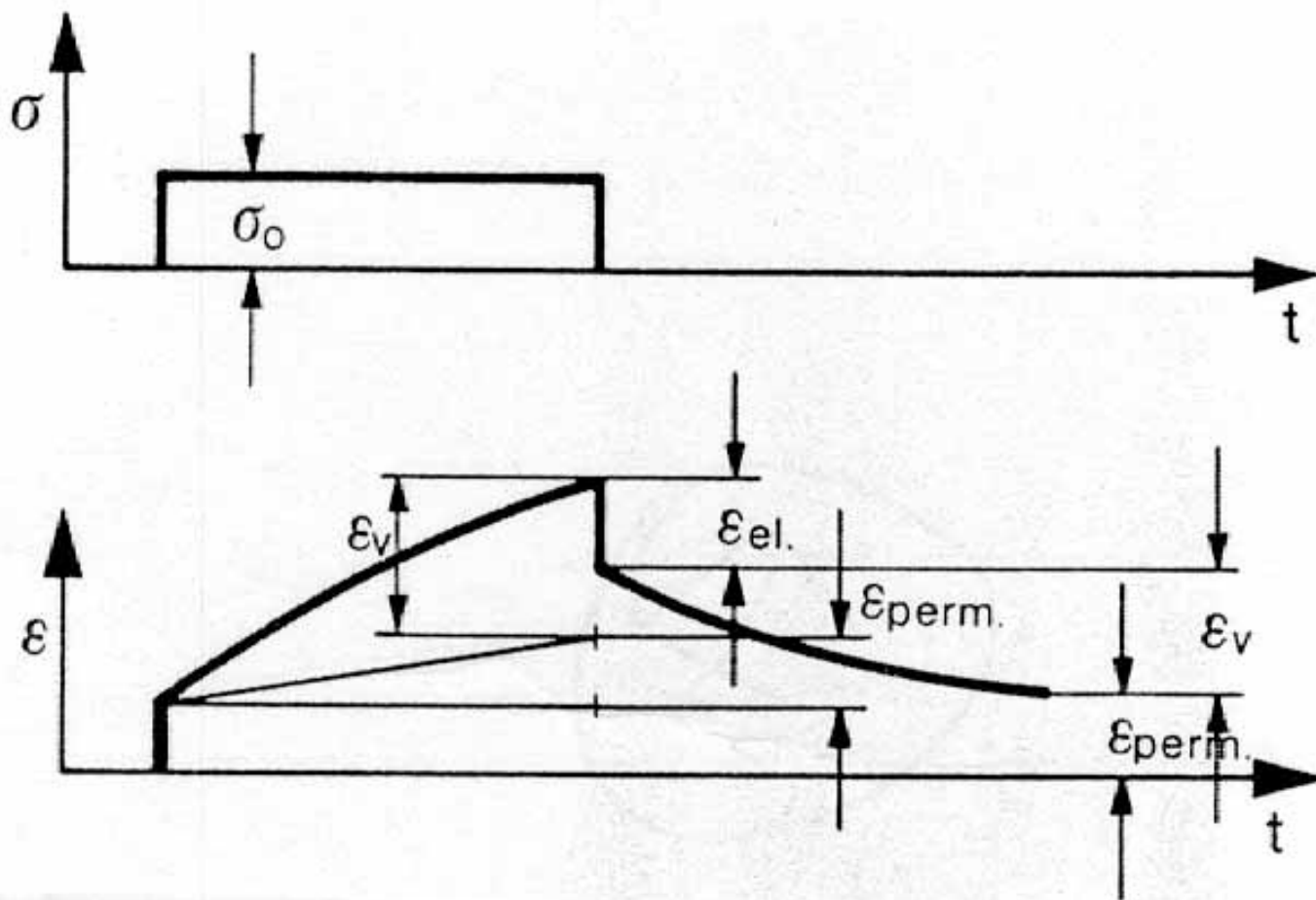



Fig. 18 Deformazione di materie plastiche con carico e scarico statico
La figura mostra l’andamento della deformazione nelle materie plastiche quando sottoposte a carico e scarico statico: la deformazione può considerarsi costituita da una componente elastica (ε_{el}), da una componente viscoso-elastica (ε_{v}) e da una componente viscosa (ε_{perm}) (Hoechst, 1979[1], p. 10).

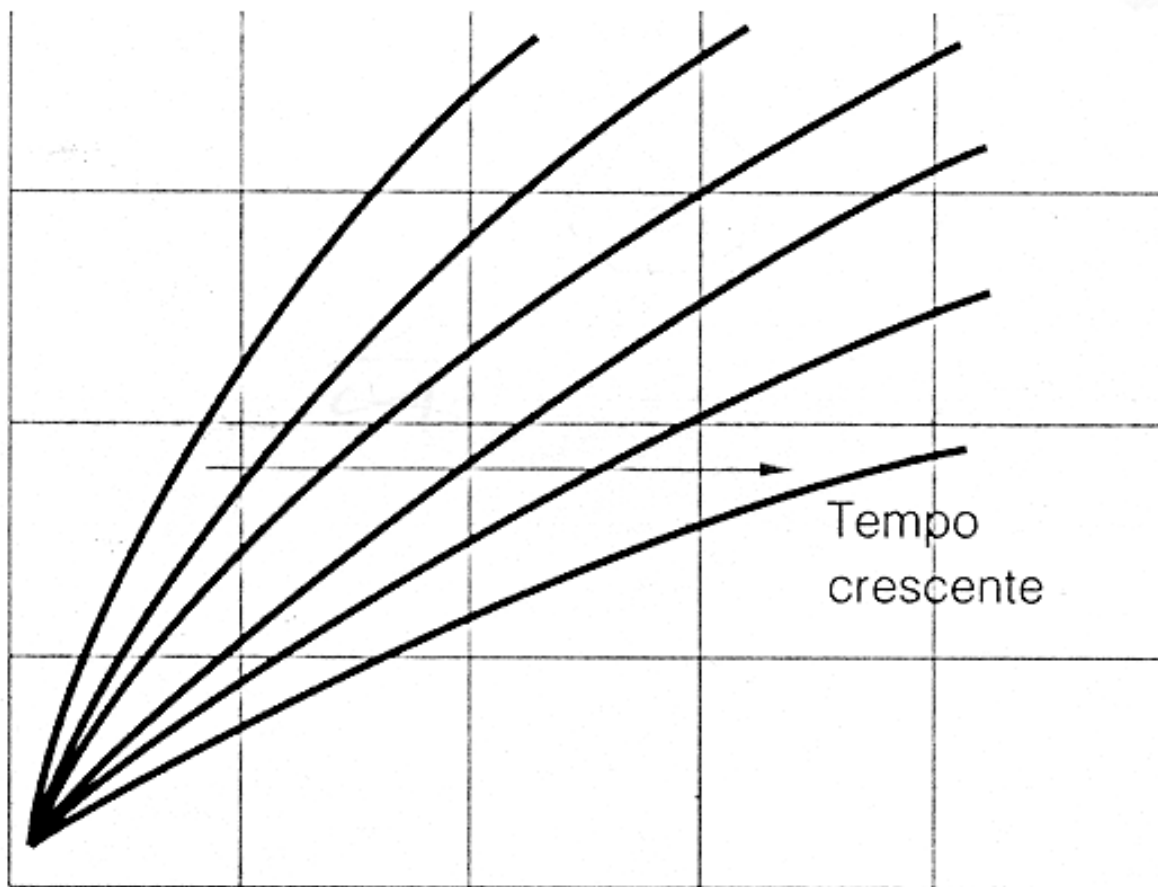



Fig. 19 Curve isocrone di carico / allungamento
La figura mostra alcune curve isocrone di carico / allungamento, curve che hanno il vantaggio di illustrare in modo conciso le informazioni riguardanti l'effetto della sollecitazione e del tempo sull'entità della deformazione (GE Plastics, 1994, p. 25).

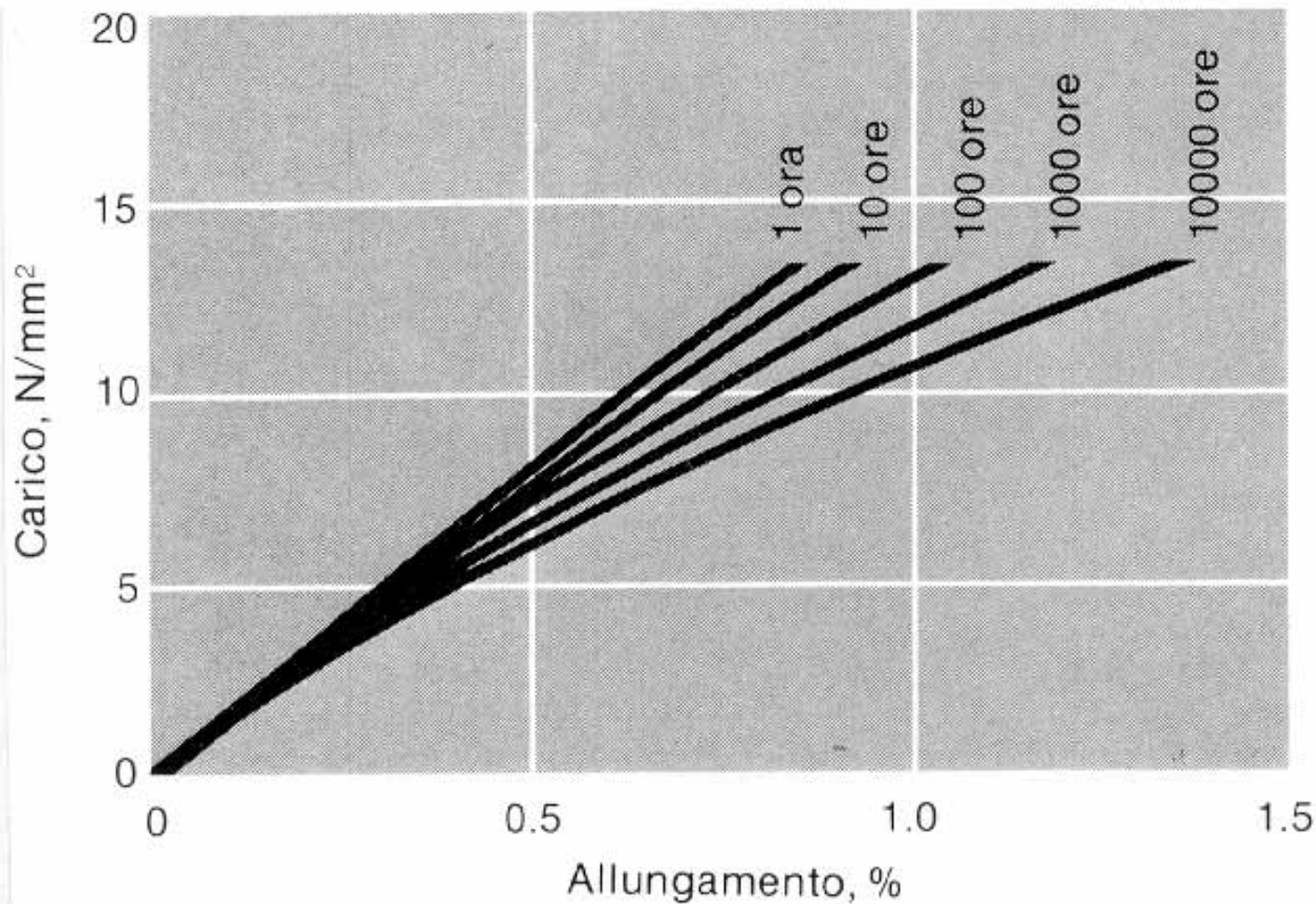



Fig. 20 Curve isocrone di carico / allungamento
La figura mostra alcune curve isocrone di carico / allungamento, relative al policarbonato (PC) non caricato, misurate a 70 °C. Queste curve hanno il vantaggio di illustrare in modo conciso le informazioni riguardanti l'effetto della sollecitazione e del tempo sull'entità della deformazione (GE Plastics, 1989[1], p. 24).

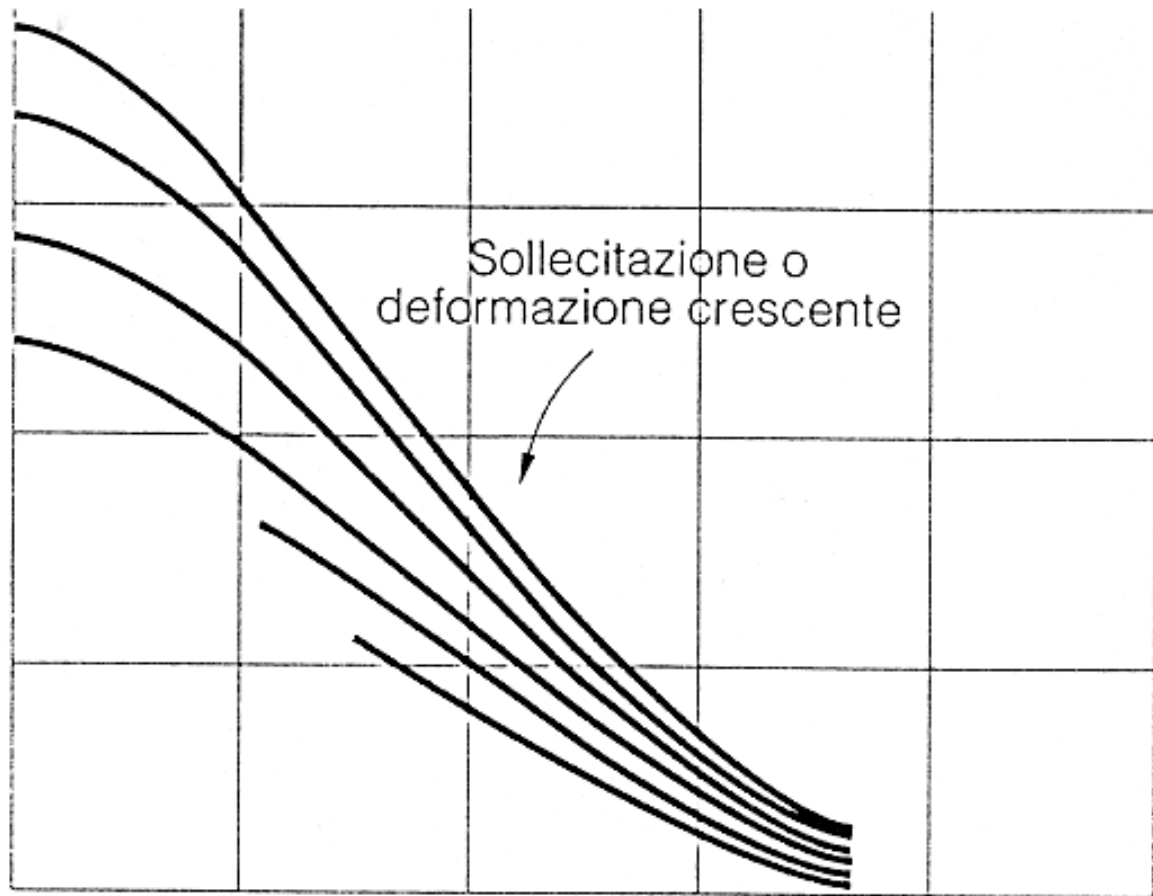



Fig. 21 Modulo di scorrimento
La figura mostra la curva relativa all'andamento del modulo elastico di un policarbonato (PC) misurato, a temperatura ambiente, in funzione del tempo e dell'entità della sollecitazione o della deformazione (GE Plastics, 1994, p. 25).

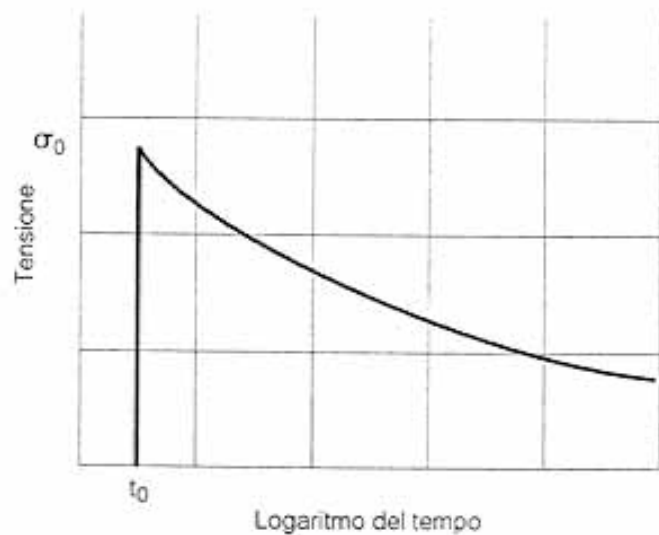
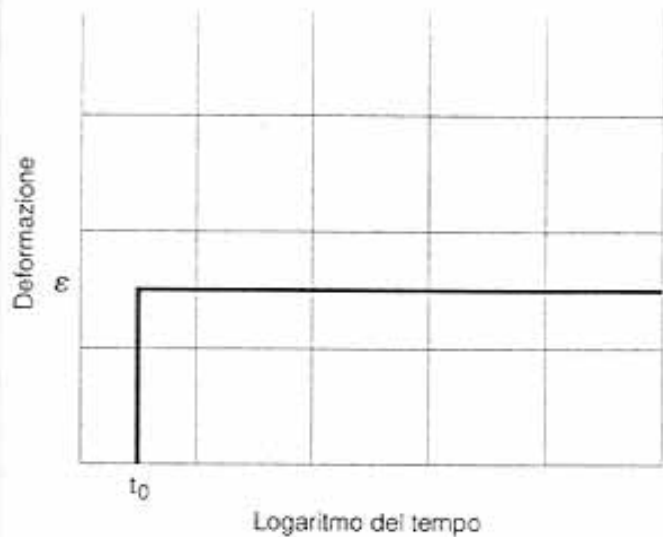



Fig. 22 Rilasciamento delle tensioni
La figura mostra la curva relativa al rilasciamento delle tensioni in funzione del tempo in un materiale viscoelastico sottoposto a una deformazione costante (GE Plastics, 1994, p. 25).

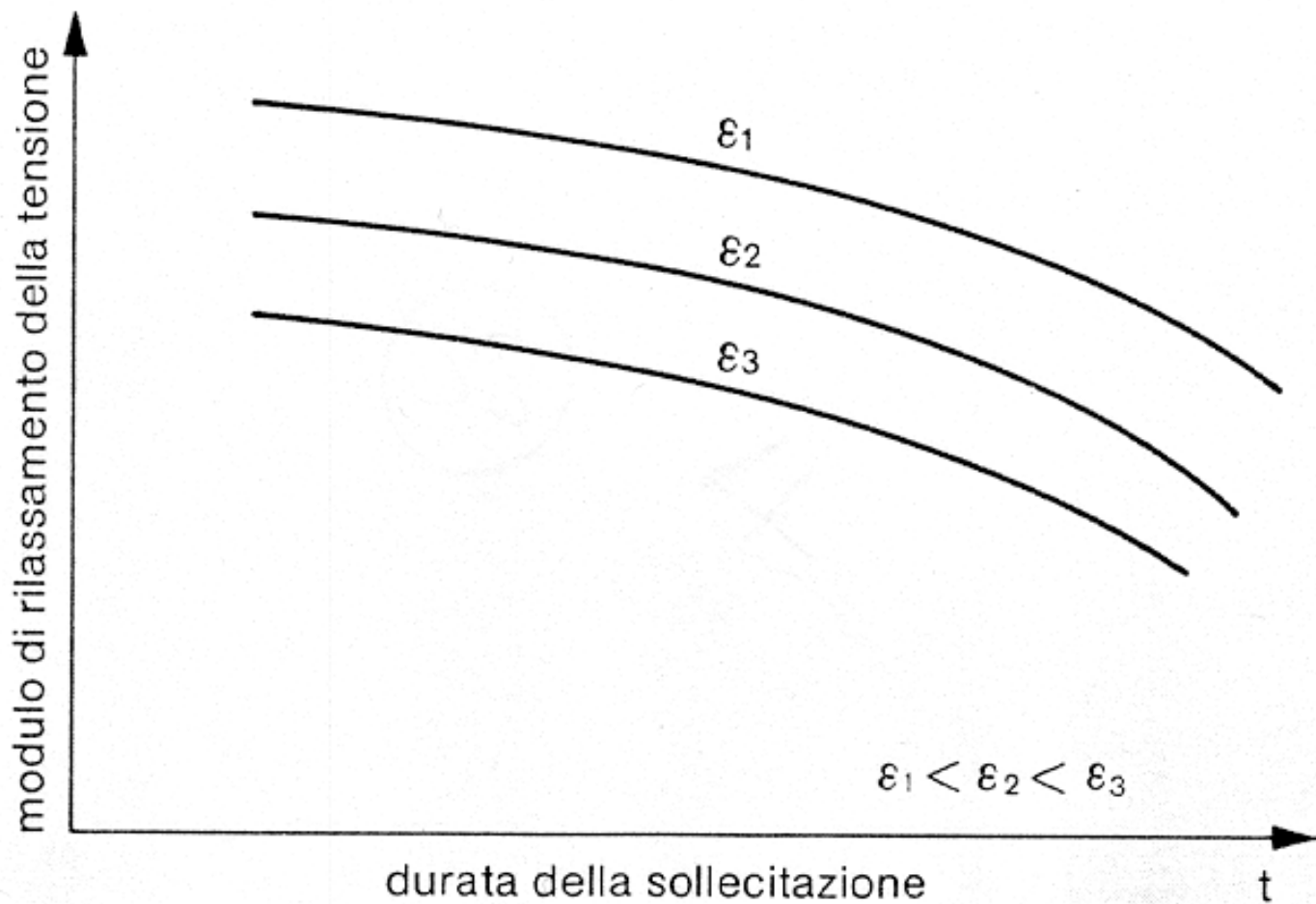



Fig. 23 Modulo di rilasciamento
La figura mostra la curva relativa all'andamento del modulo elastico in un materiale viscoelastico in funzione del tempo e in funzione di diversi livelli di deformazione costante (Hoechst, 1979[1], p. 12).

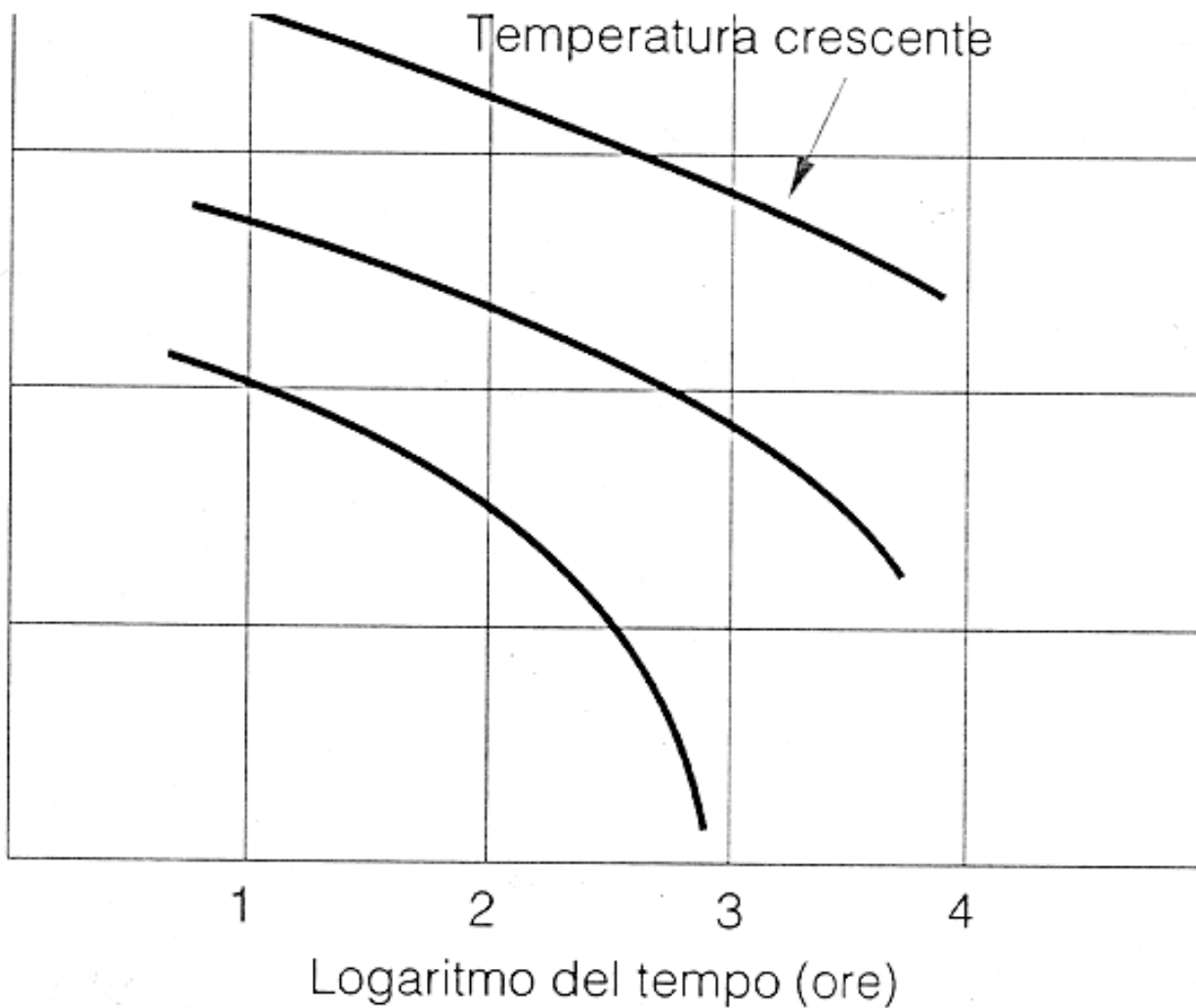



Fig. 24 Influenza della temperatura sulla viscosità
La figura mostra l'influenza della temperatura sulla viscosità ("creep") delle materie plastiche, i cui effetti sono amplificati dall'aumento della temperatura (GE Plastics, 1994, p. 37).

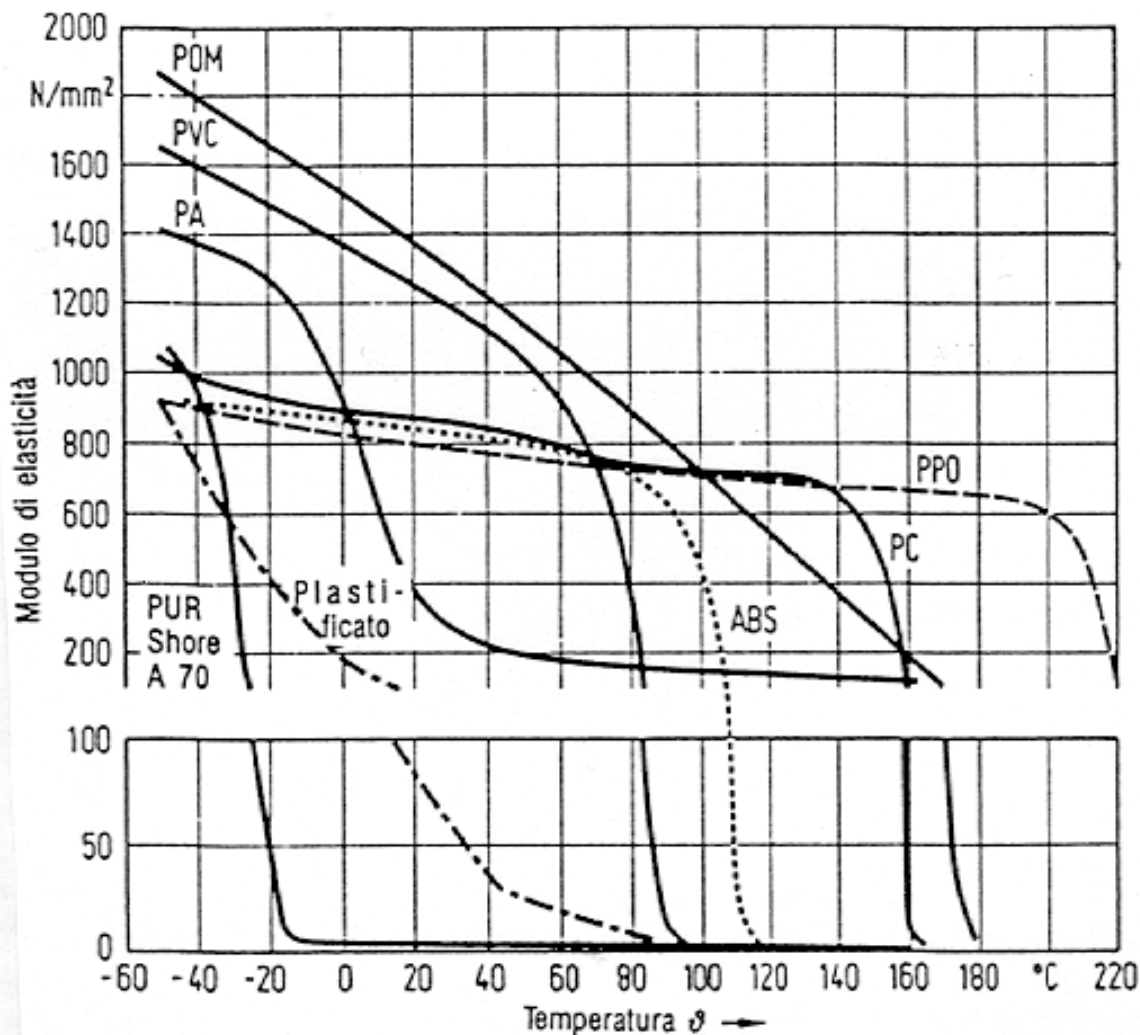



Fig. 25 Influenza della temperatura sul modulo elastico
La figura mostra l'influenza della temperatura sul modulo elastico di alcune materie plastiche tra cui il poliossimetilene (POM), il polivinilcloruro (PVC), i poliammidi (PA), il polifenilenossido (PPO), il policarbonato (PC), il poliuretano (PUR) e l'acrilonitrile butadienestirene (ABS) (Oberbach, Muller, 1987, p. 67).

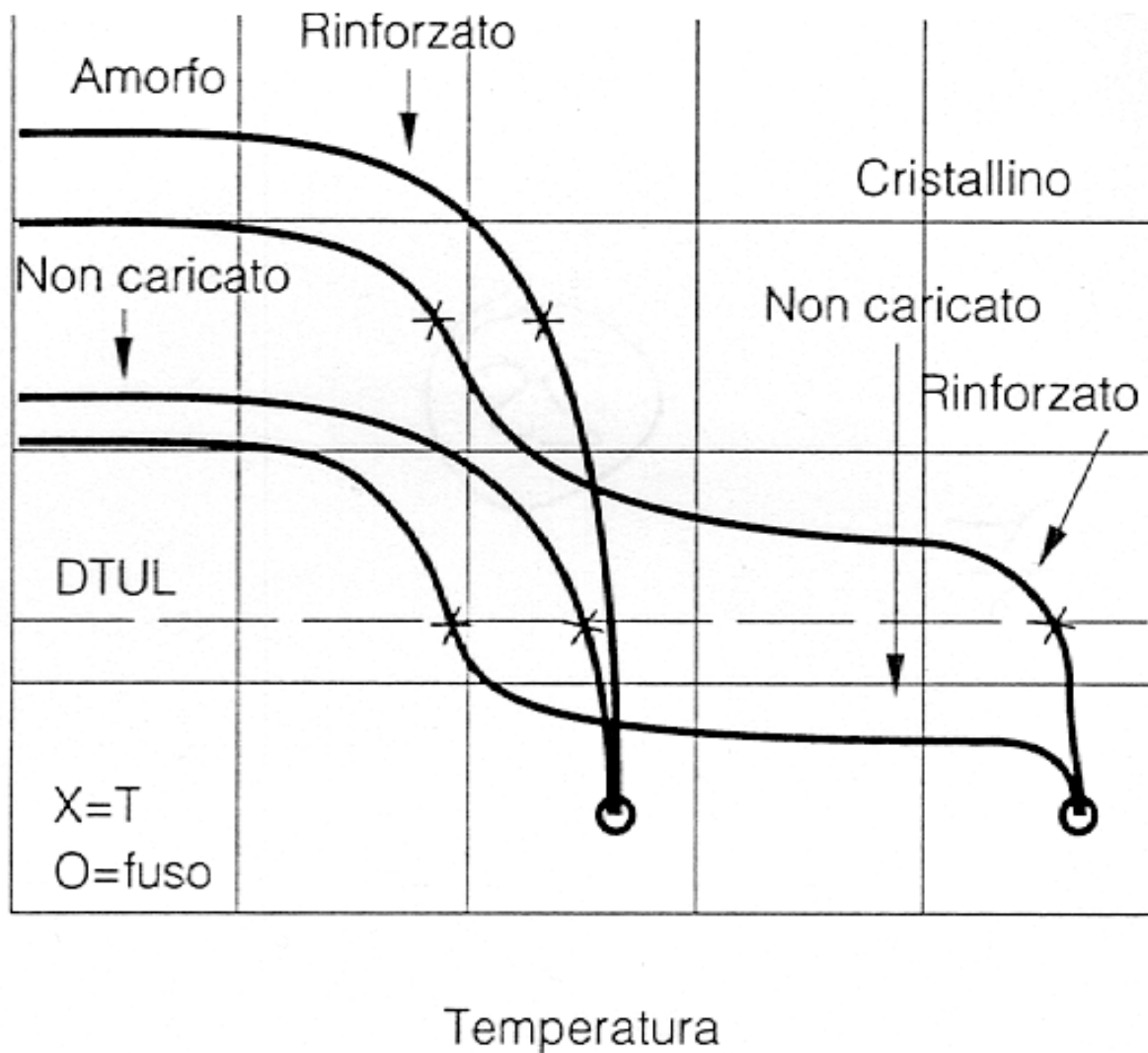



Fig. 26 Influenza della temperatura sul modulo elastico
La figura mostra l'influenza della temperatura sul modulo elastico delle materie plastiche in funzione della struttura della macromolecola polimerica (cristallina o amorfa) e in funzione della presenza di cariche e rinforzi. Inoltre, viene indicata la temperatura di deformazione sotto carico ("Deflection Temperature Under Load"), con la quale si stabilisce la capacità relativa di un materiale polimerico di mantenere le proprie caratteristiche sotto carico e con temperatura elevata (GE Plastics, 1994, p. 37).

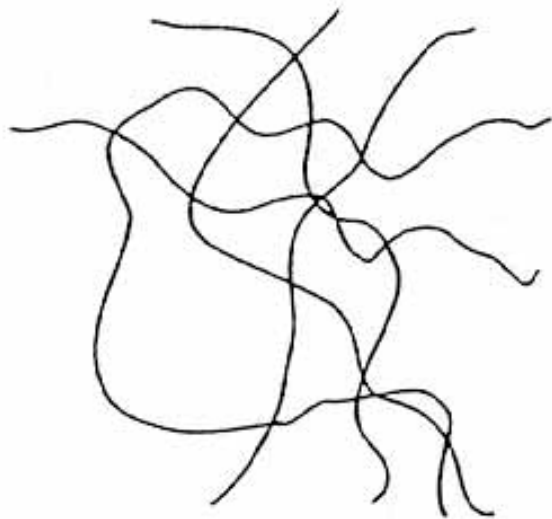
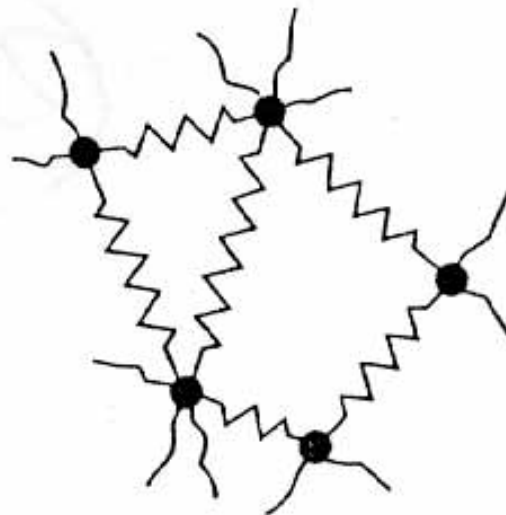



Fig. 27 Modello fisico delle catene macromolecolari viscoelastiche
La figura mostra la rappresentazione grafica delle catene macromolecolari di un materiale viscoelastico, in cui si evidenzia l'esistenza di giunzioni labili ("entanglement") tra le catene: in questa schematizzazione le catene fra due giunzioni rappresentano le molle, quindi i corpi elastici, mentre le giunzioni rappresentano i punti di attrito, quindi i dissipatori viscosi costituenti il materiale (La Mantia, 1995[1], p. 61).

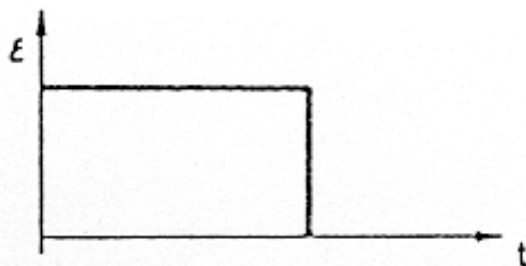
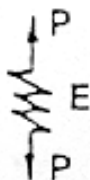
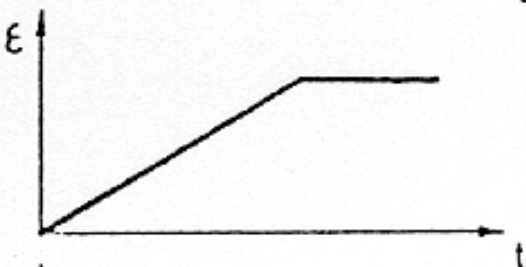
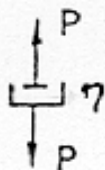
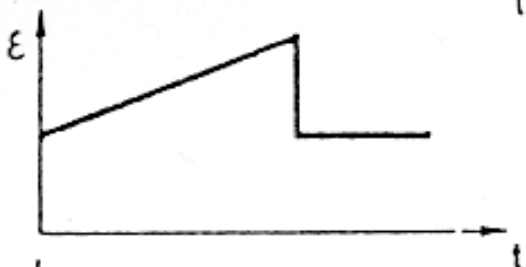
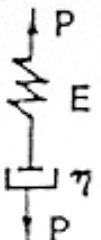
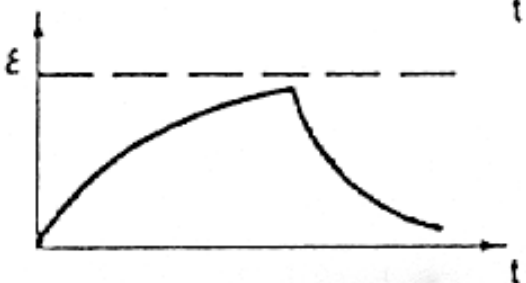
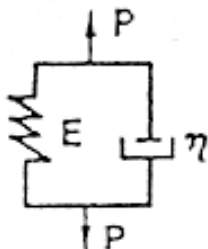



Fig. 28 Modelli meccanici del comportamento elastico, viscoso e viscoelastico
La figura mostra la rappresentazione grafica di alcuni modelli meccanici che simulano il comportamento viscoelastico: in particolare sono riportati il modello di Hooke, di Newton, di Maxwell e di Kelvin - Voigt (Bertacchi, 1980, p. 35).

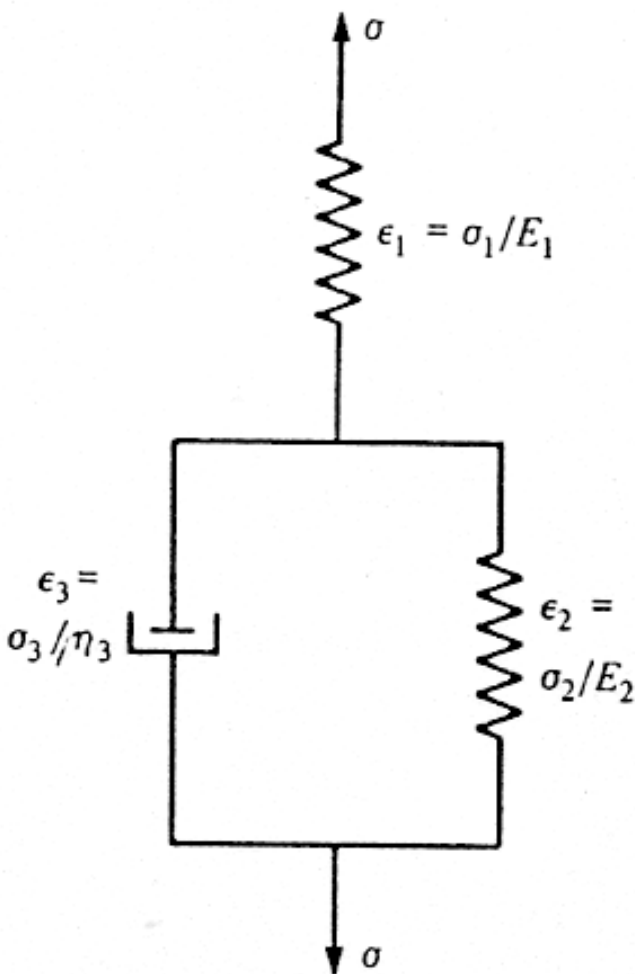



Fig. 29 Modello meccanico di Burger del comportamento viscoelastico
La figura mostra la rappresentazione grafica del modello meccanico del comportamento viscoelastico dei materiali polimerici elaborato da Burger: si tratta di una molla e, in serie, di un sistema costituito da una molla e un dissipatore viscoso in parallello (Powell, 1983, p. 90).

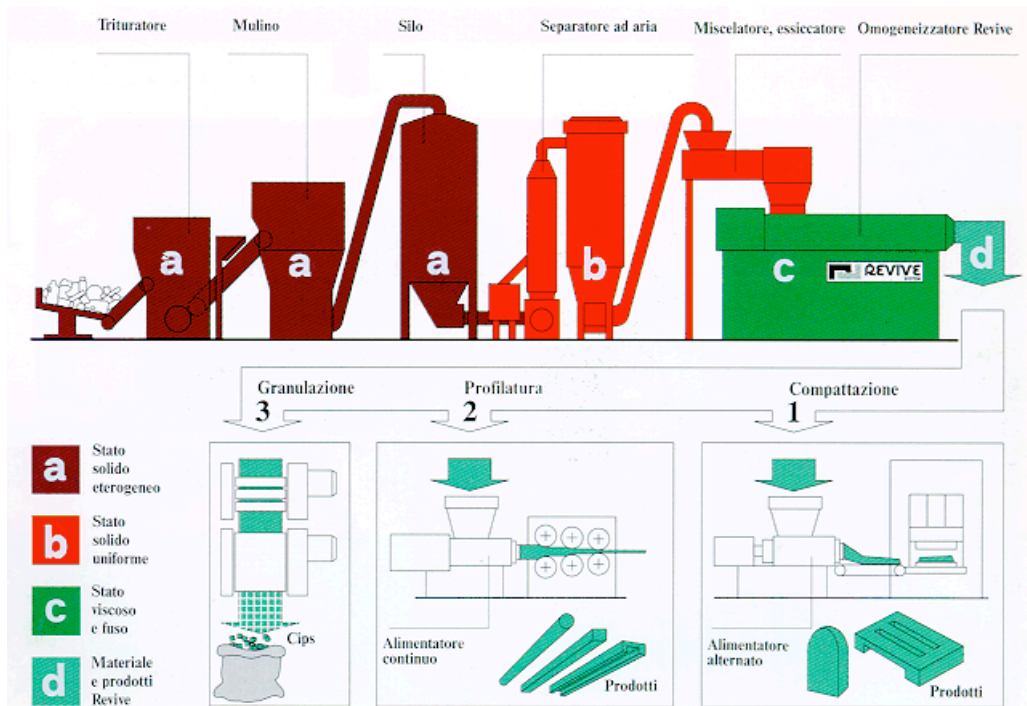



Fig. 30 Sistema Revive per il riciclo meccanico di materie plastiche
La figura mostra lo schema dell'impianto per il riciclo meccanico di materie plastiche messo a punto dalla Cadauta Revive di San Sebastiano da Po (TO): si tratta di un impianto utilizzabile per lavorare materie plastiche eterogenee ma che, senza la fase di separazione, riproduce lo schema di lavorazione anche di materiali omogenei (AA.VV., 1996[1], p. 4).

Fig. 31 Sistema SPI di codificazione
La figura mostra il sistema di codificazione elaborato dalla Society of the Plastics Industries Inc. (USA) ai fini dell'identificazione delle materie plastiche durante le operazioni di riciclo (EVC, 1991, p. 11).

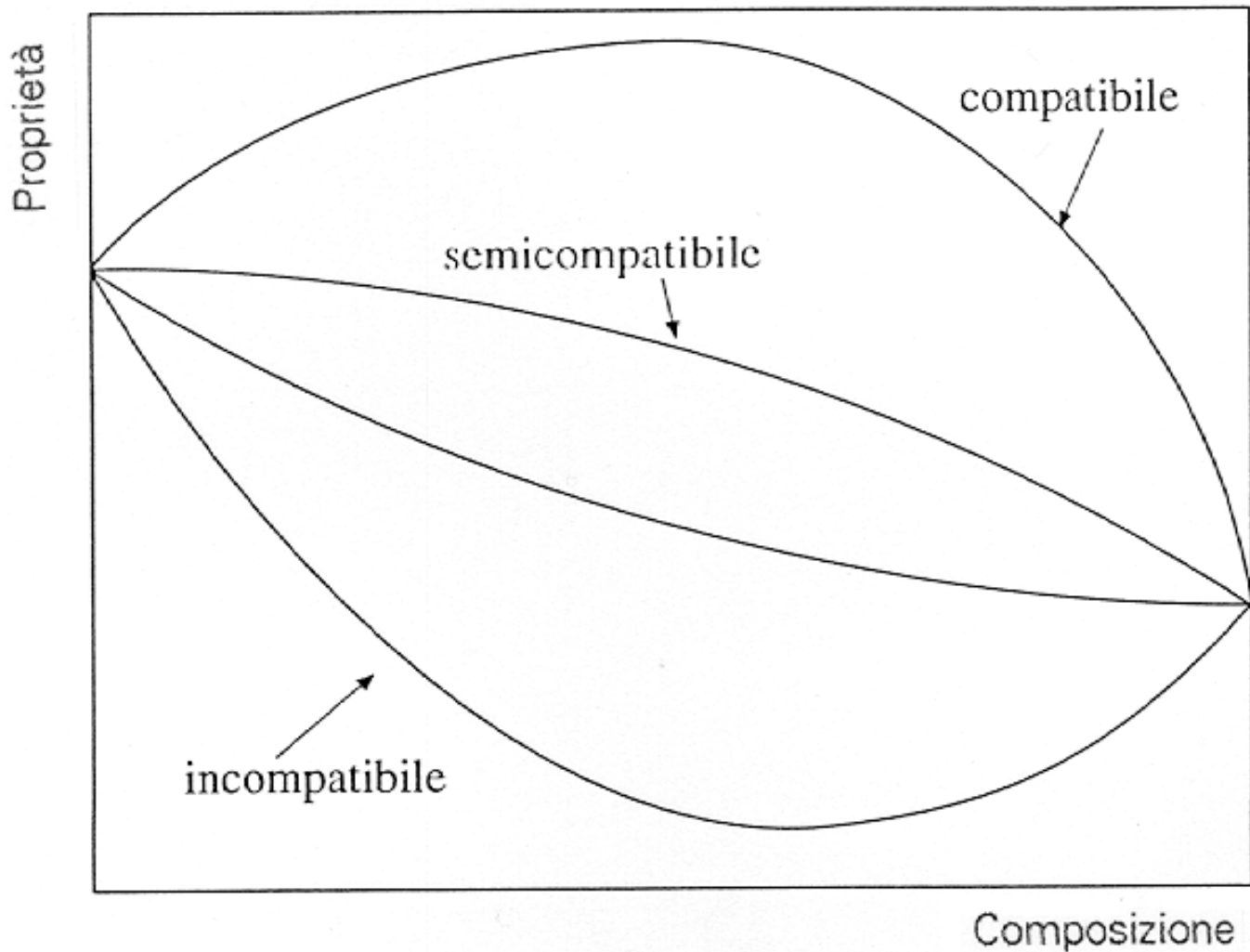



Fig. 32 Compatibilità delle materie plastiche
La figura mostra i diversi livelli di compatibilità che possono esistere tra materie plastiche: da un punto di vista tecnologico si possono definire compatibili quei polimeri che in miscela presentano, attraverso un effetto sinergico, proprietà migliori dei singoli componenti (vedi punto di massimo nella curva superiore delle proprietà), incompatibili quelli che in miscela, per effetto antagonista, hanno proprietà inferiori (vedi punto di minimo nella curva inferiore delle proprietà) e, infine, semicompatibili quei polimeri che presentano, se miscelati, proprietà intermedie ai due componenti (curve mediane delle proprietà) (La Mantia, 1995[6], p. 9).

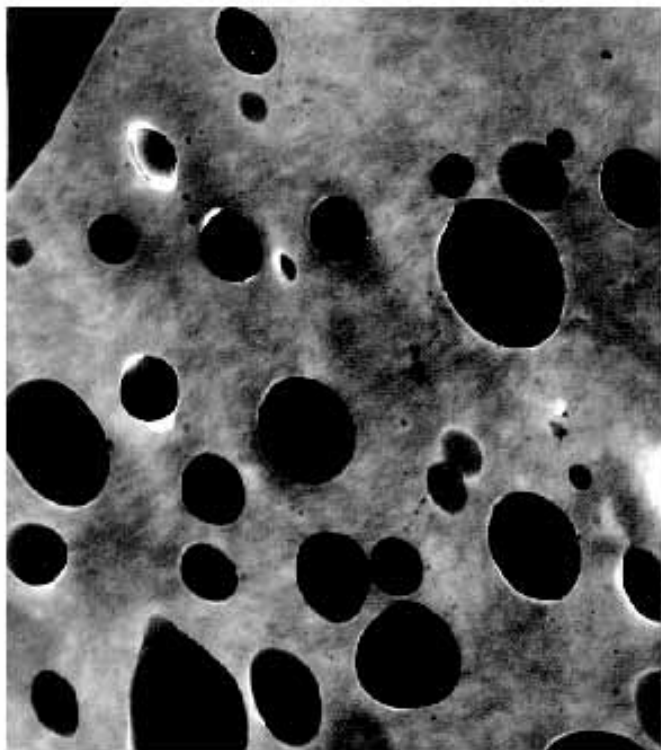
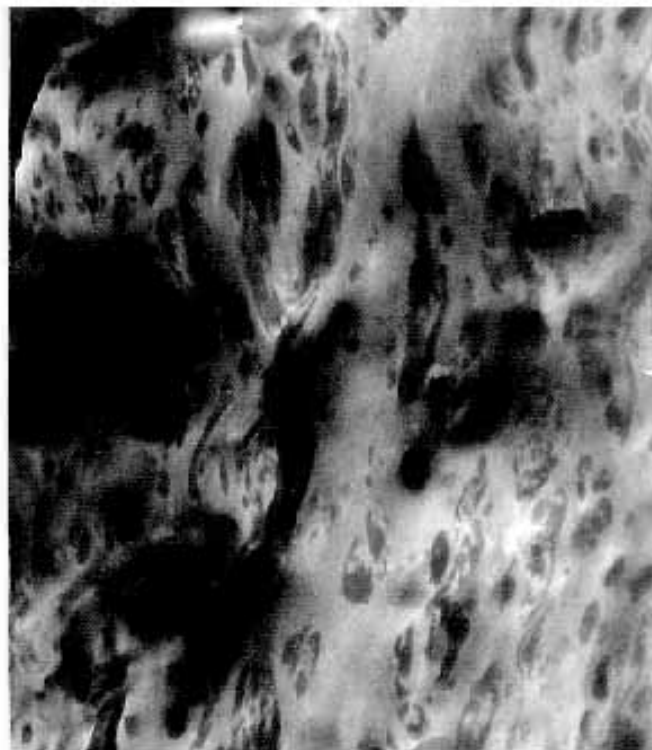



Fig. 33 Miscela di polimeri incompatibili e compatibili
La figura mostra l'ingrandimento fotografico di una miscela tra due polimeri incompatibili, che formano una emulsione simile a quella tra olio e acqua e tra due polimeri compatibili, in cui le particelle sono disperse nella matrice (Dupont, 1993, p. 2).

	PS	HIPS	SAN	ABS	PA	PC	PMMA	PF	PVC	PP	HDPE	LDPE	PBTP
HIPS	1												
SAN	6	6											
ABS	6	6	1										
PA	5	4	6	6									
PC	6	5	2	2	6								
PMMA	4	4	1	1	6	1							
PF	6	6	6	5	6	6	5						
PVC	6	6	2	3	6	5	1	6					
PP	6	6	6	6	6	6	6	6	6				
HDPE	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6			
LDPE	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	1		
PBTP	6	6	6	5	5	1	6	6	6	6	6	6	
PETP	5	5	6	5	5	1	6	6	6	6	6	6	6

Fig. 34 Compatibilità tra materie termoplastiche
La figura mostra il livello di compatibilità tra le principali categorie di polimeri teermoplastici: il grado varia da 1 = completamente compatibile a 6 = incompatibile (Wetzel, 1987, p. 14).

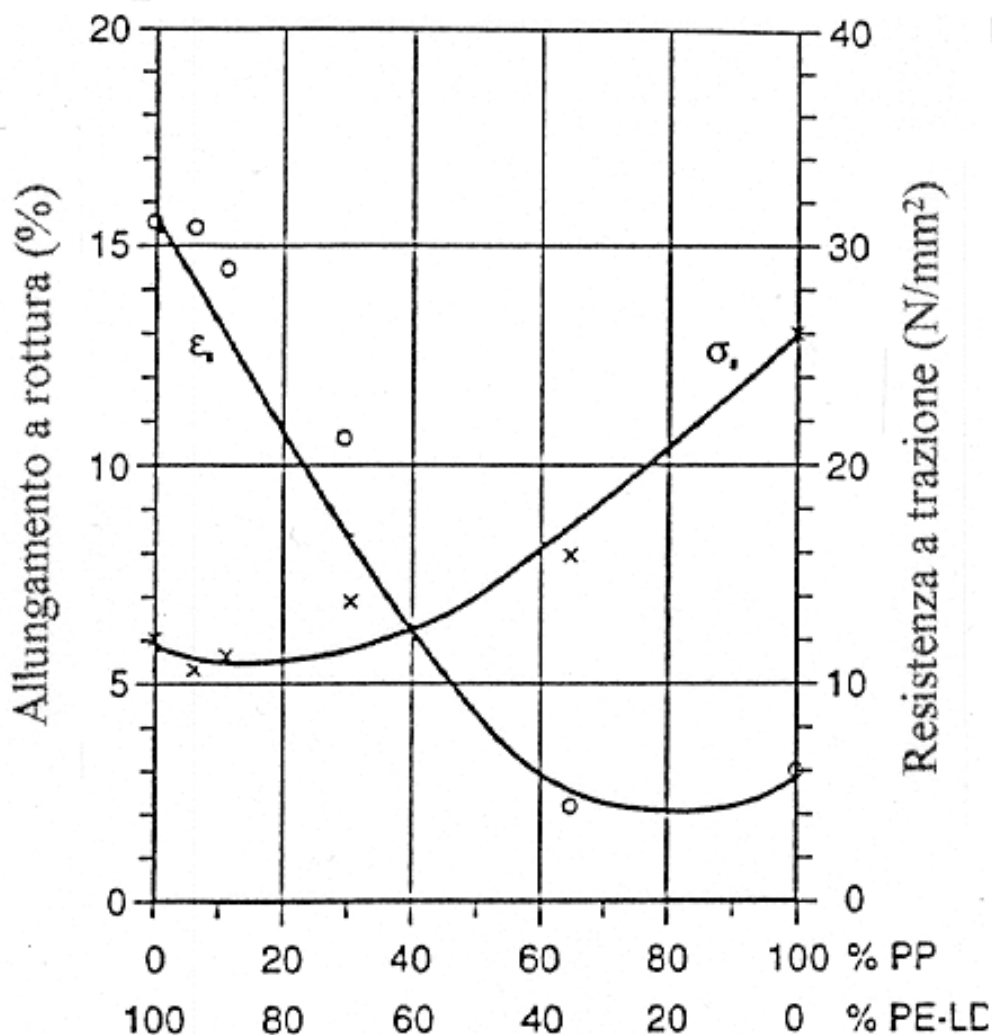



Fig. 35 Compatibilità tra poliolefine
La figura mostra l'andamento della resistenza a trazione e dell'allungamento a rottura in una miscela tra polietilene a bassa densità (LDPE) e polipropilene (PP). Nell'andamento della resistenza a trazione (curva S) si rileva, per aggiunte di PP intorno al 5 %, una caduta della tensione addirittura sotto il valore del LDPE puro; successivamente questo andamento è influenzato dalla più elevata resistenza a trazione del PP; nell'andamento dell'allungamento a rottura (curva e) si rileva un netto decadimento dei valori relativi al LDPE puro per aggiunte di PP, con un minimo in presenza di una frazione di PP dal 60 % all'80 % in peso (Herren, et alii, 1995, p. 31).

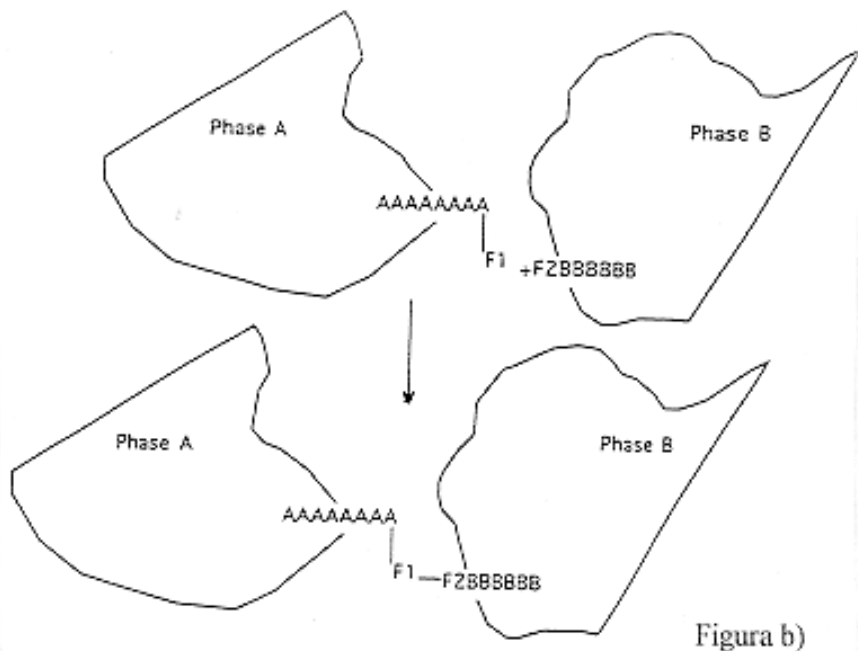



Fig. 36 Azione fisica e chimica degli additivi compatibilizzanti
La figura mostra i due differenti tipi di azione attraverso i quali gli additivi compatibilizzanti creano un ponte tra due fasi incompatibili: l'azione può essere di tipo fisico, qualora l'additivo leghi direttamente le due fasi come terzo componente (a), oppure di tipo chimico, nel caso si abbia una reazione tra gruppi funzionali dell'additivo e dei polimeri (b) (La Mantia, 1996).

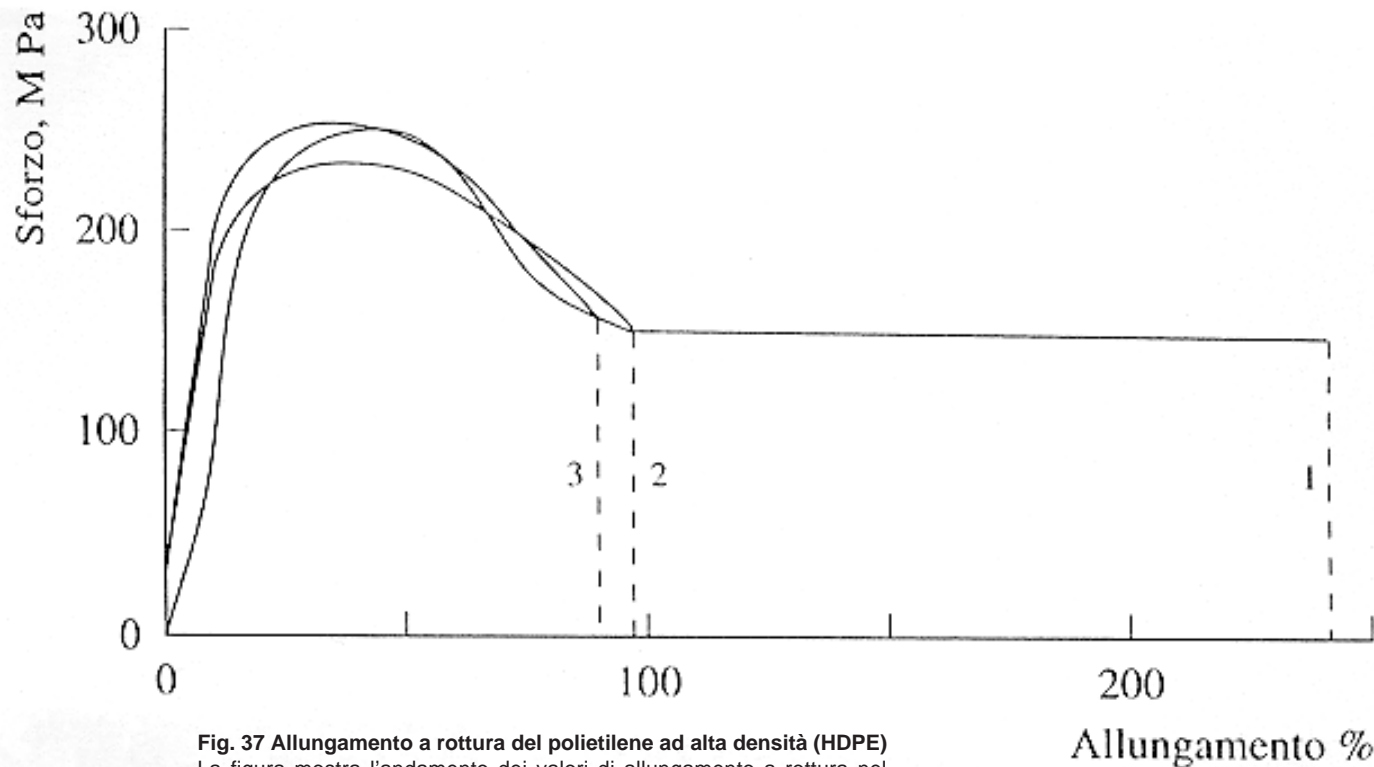



Fig. 37 Allungamento a rottura del polietilene ad alta densità (HDPE)
La figura mostra l'andamento dei valori di allungamento a rottura nel polietilene ad alta densità (HDPE) in funzione dei cicli di lavorazione: in generale, passando da uno a tre cicli (1-2-3) questi valori diminuiscono per la maggiore rigidità dovuta alle reticolazioni (La Mantia, 1995[6], p. 25).

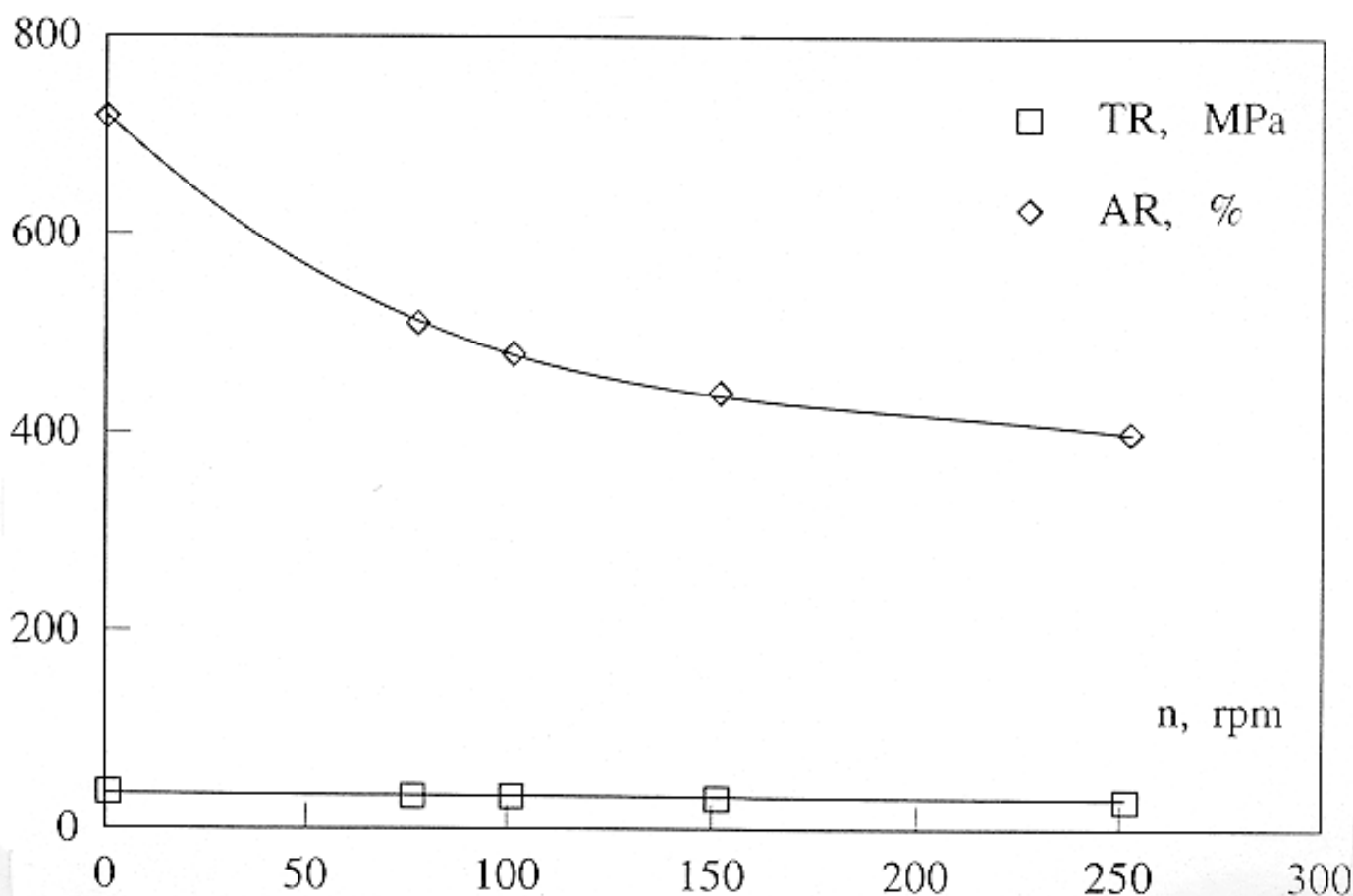



Fig. 38 Allungamento e tensione a rottura del polipropilene (PP)
La figura mostra l’andamento dei valori di tensione (TR) e allungamento a rottura (AR) di un campione di polipropilene (PP) in funzione del numero di giri durante la lavorazione, quindi, in funzione della degradazione termomeccanica (La Mantia, 1995[6], p. 26).

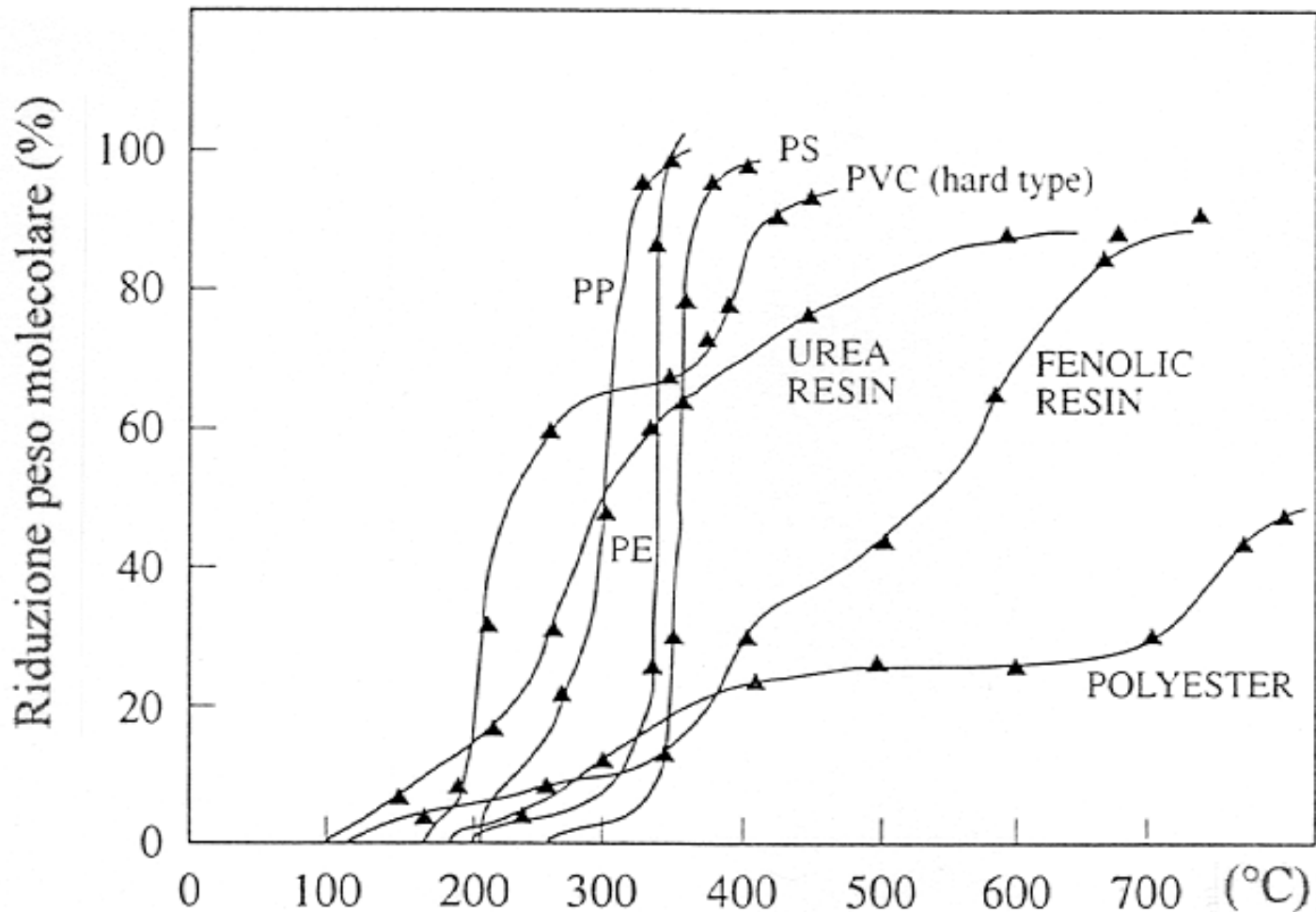



Fig. 39 Variazione del peso molecolare con la temperatura
La figura mostra l'andamento del peso molecolare in alcuni polimeri in funzione della temperatura di lavorazione; in particolare si considerano il polipropilene (PP), il polietilene (PE), il polistirene (PS), il polivinilcloruro (PVC), le resine ureiche (UF), le resine fenoliche (PF) e il poliestere (UP) (La Mantia, 1995[6], p. 32).

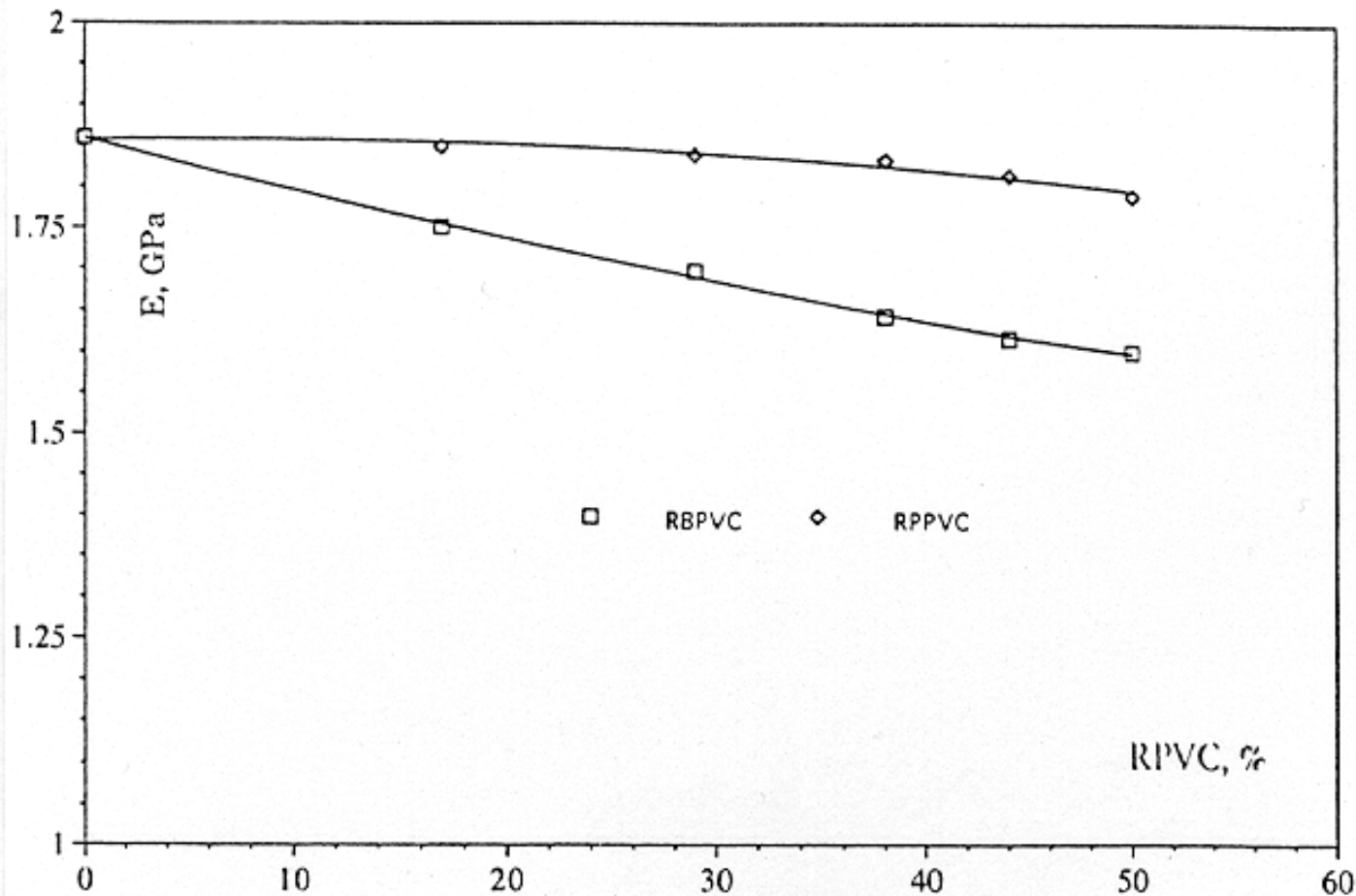



Fig. 40 Modulo elastico del polivinilcloruro (PVC) riciclato
La figura mostra la variazione del modulo elastico (E) del polivinilcloruro (PVC) in funzione della percentuale di materiale riciclato aggiunta, sia nel caso di materiale proveniente dal riciclo di bottiglie in PVC (RBPVC), sia nel caso di materiale proveniente dal riciclo di tubazioni in PVC (RPPVC) (Wenguang, La Mantia, 1996, p. 765).

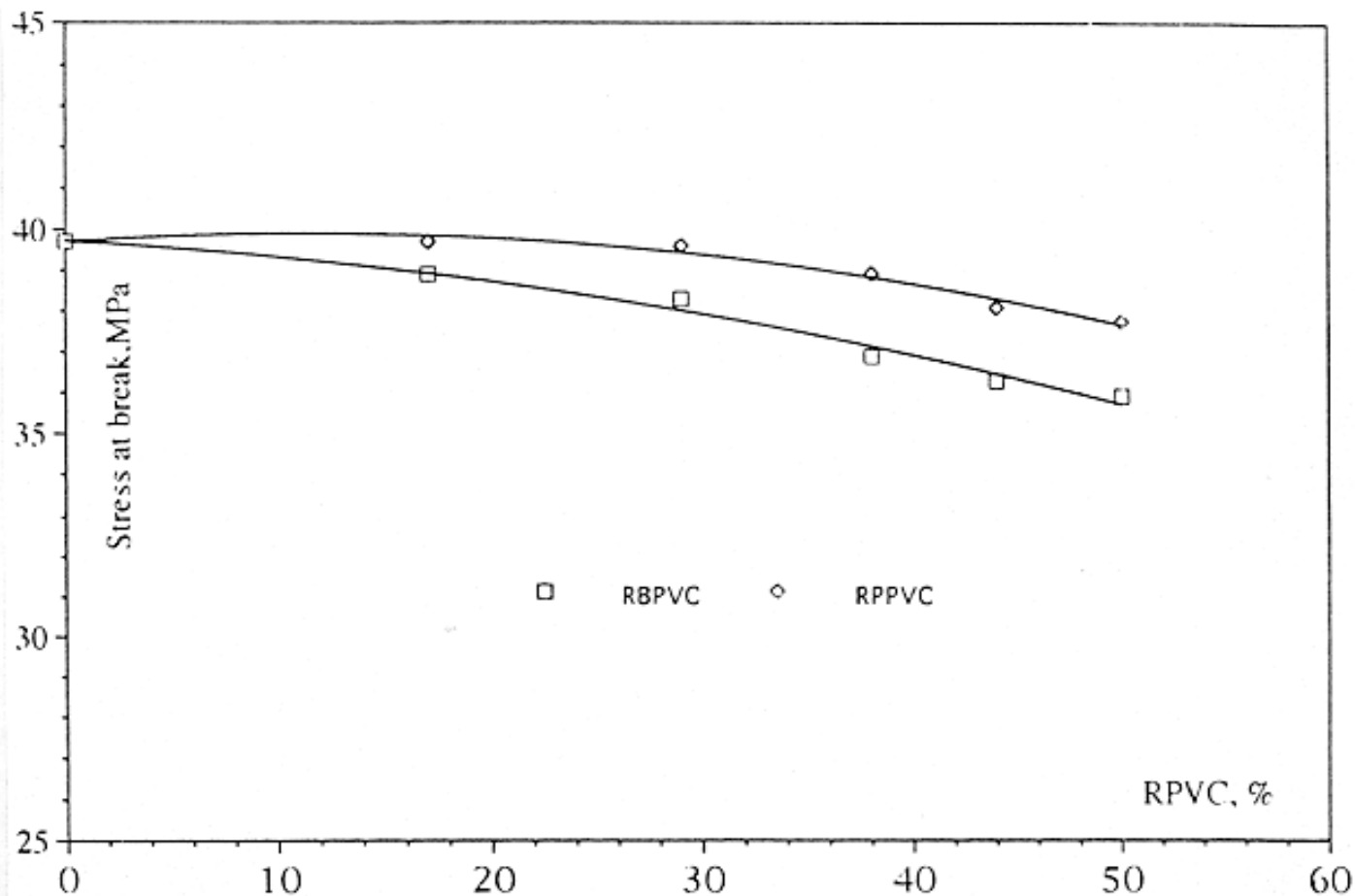



Fig. 41 Carico di rottura del polivinilcloruro (PVC) riciclato
La figura mostra la variazione del carico di rottura ("stress at break") del polivinilcloruro (PVC) in funzione della percentuale di materiale riciclato aggiunta, sia nel caso di materiale proveniente dal riciclo di bottiglie in PVC (RBPVC), sia nel caso di materiale proveniente dal riciclo di tubazioni in PVC (RPPVC) (Wenguang, La Mantia, 1996, p. 765).

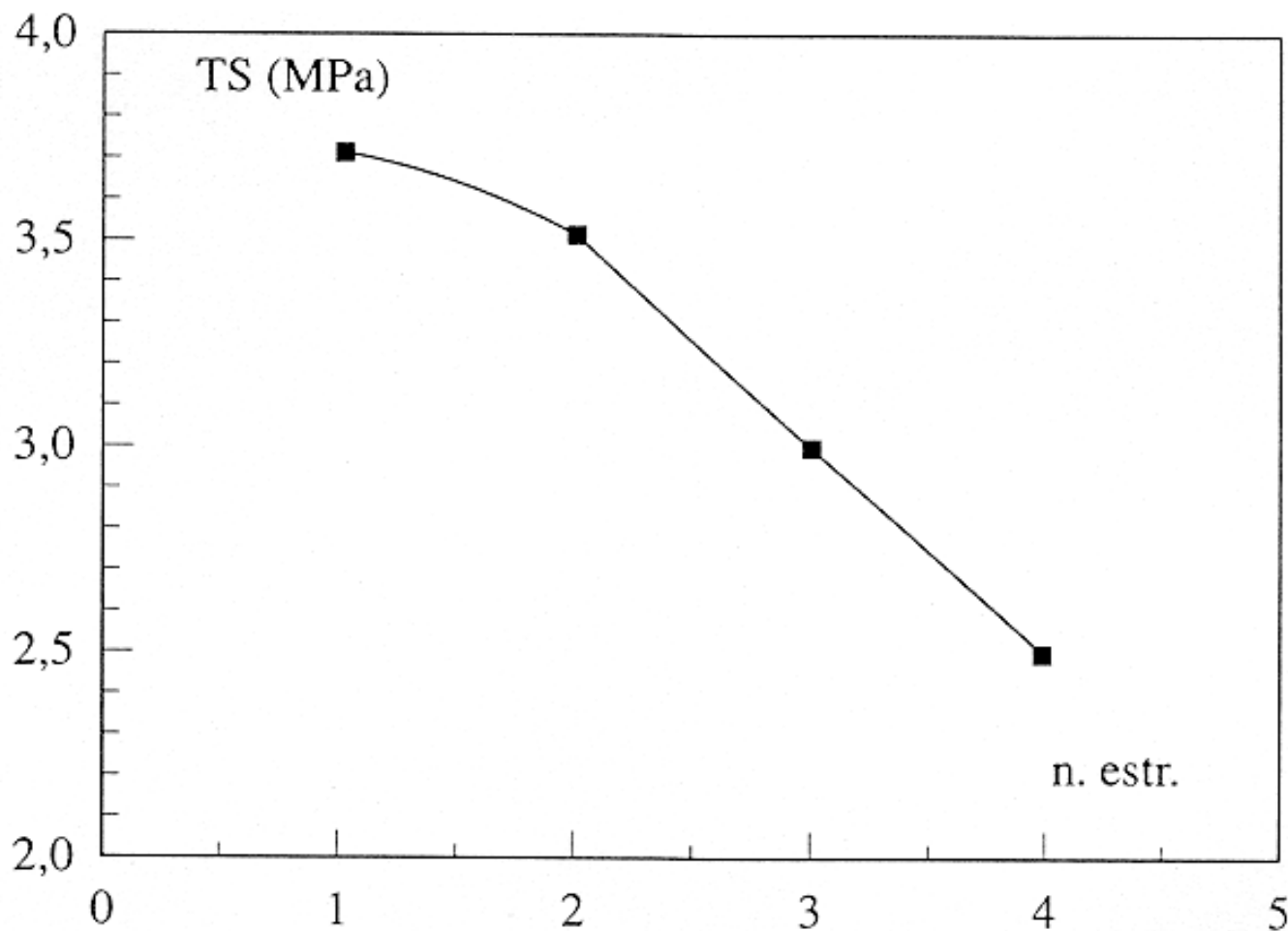



Fig. 42 Variazione della tensione a rottura nel polietilentereftalato (PET)
La figura mostra l'andamento della tensione a rottura (TS) in funzione del numero di estrusioni a cui il polietilentereftalato (PET) è sottoposto, dunque, in funzione dell'entità della degradazione (La Mantia, 1995[6], p. 64).

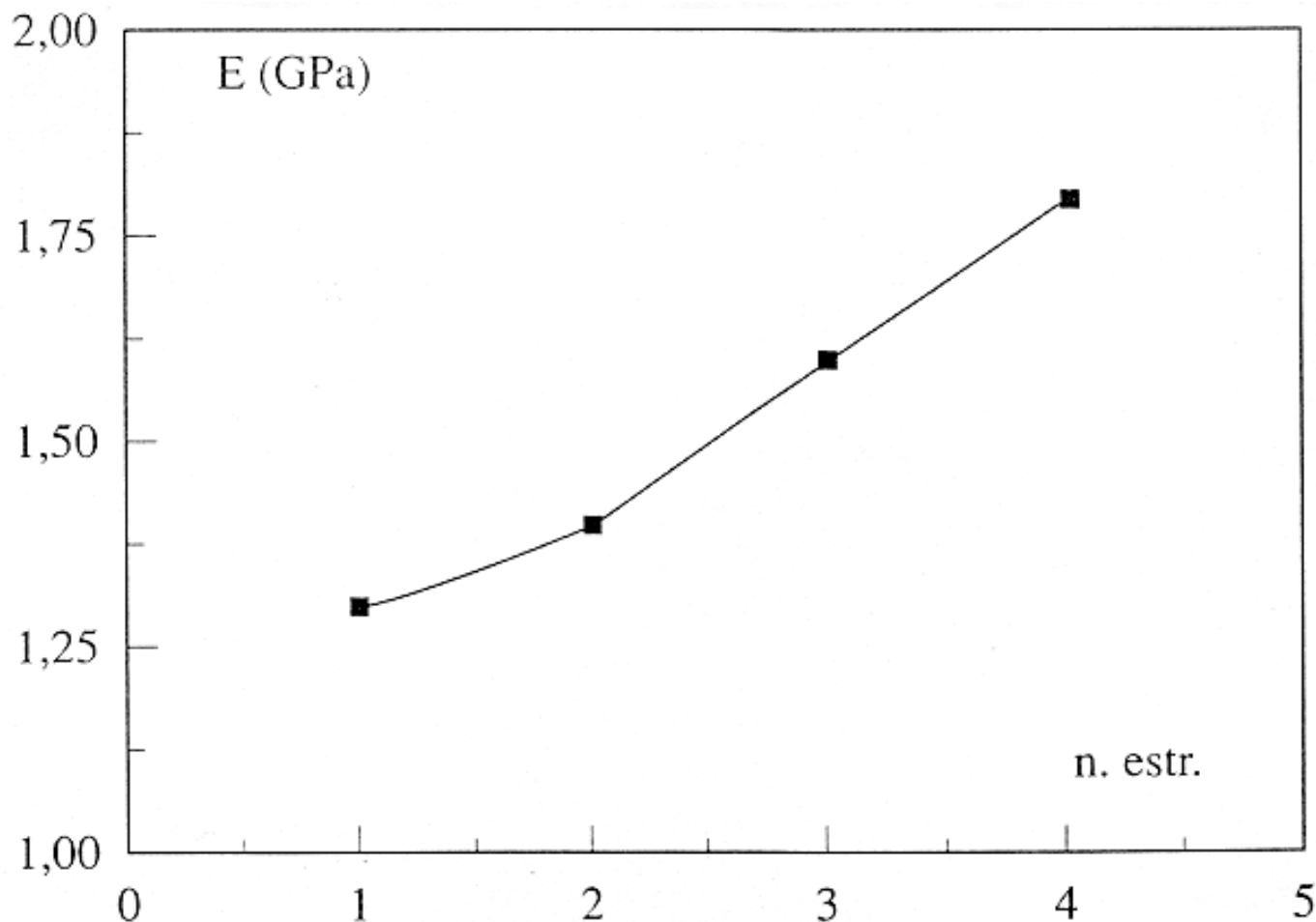



Fig. 43 Variazione della modulo elastico nel polietilentereftalato (PET)
La figura mostra l'andamento del modulo elastico (E) in funzione del numero di estrusioni a cui il polietilentereftalato (PET) è sottoposto, dunque, in funzione dell'entità della degradazione (La Mantia, 1995[6], p. 63).

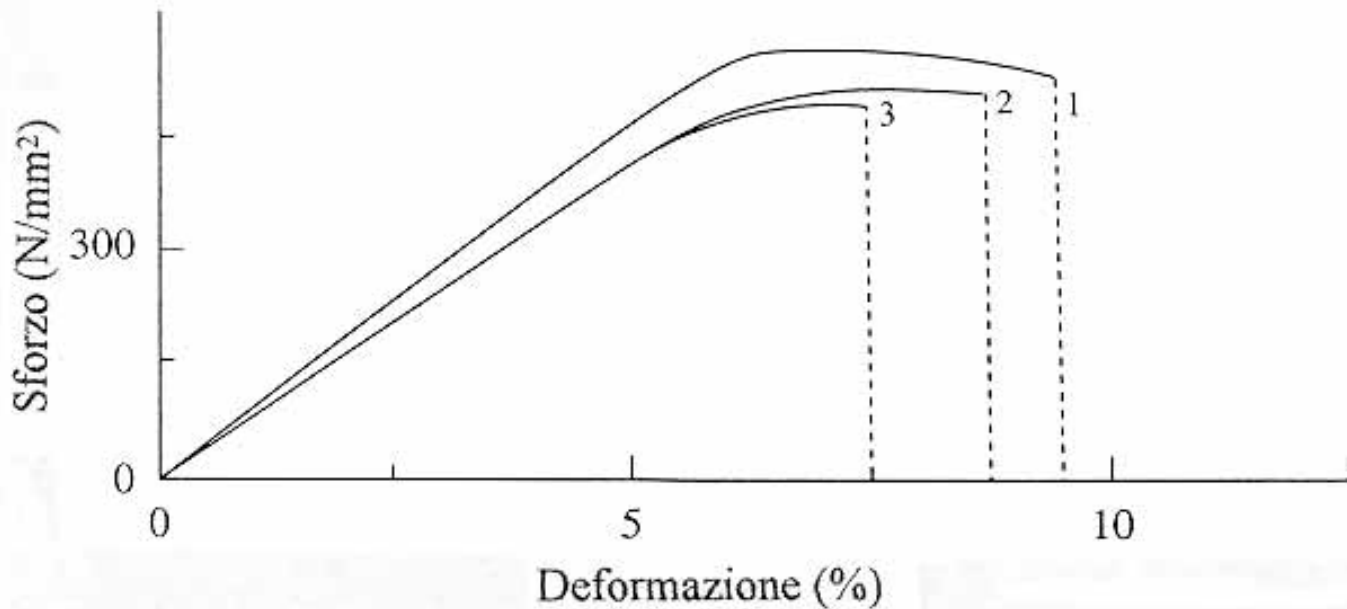



Fig. 44 Curva sforzo-deformazione di un campione di polistirene (PS) rigido
La figura mostra la curva sforzo-deformazione di un campione di polistirene (PS) rigido in funzione del numero di lavorazioni: dopo una (curva 1), cinque (curva 2) e dieci (curva 3) operazioni di stampaggio a iniezione la tensione a rottura e l'allungamento a rottura rimangono praticamente inalterati (Wenguang, La Mantia, 1996, p. 765).

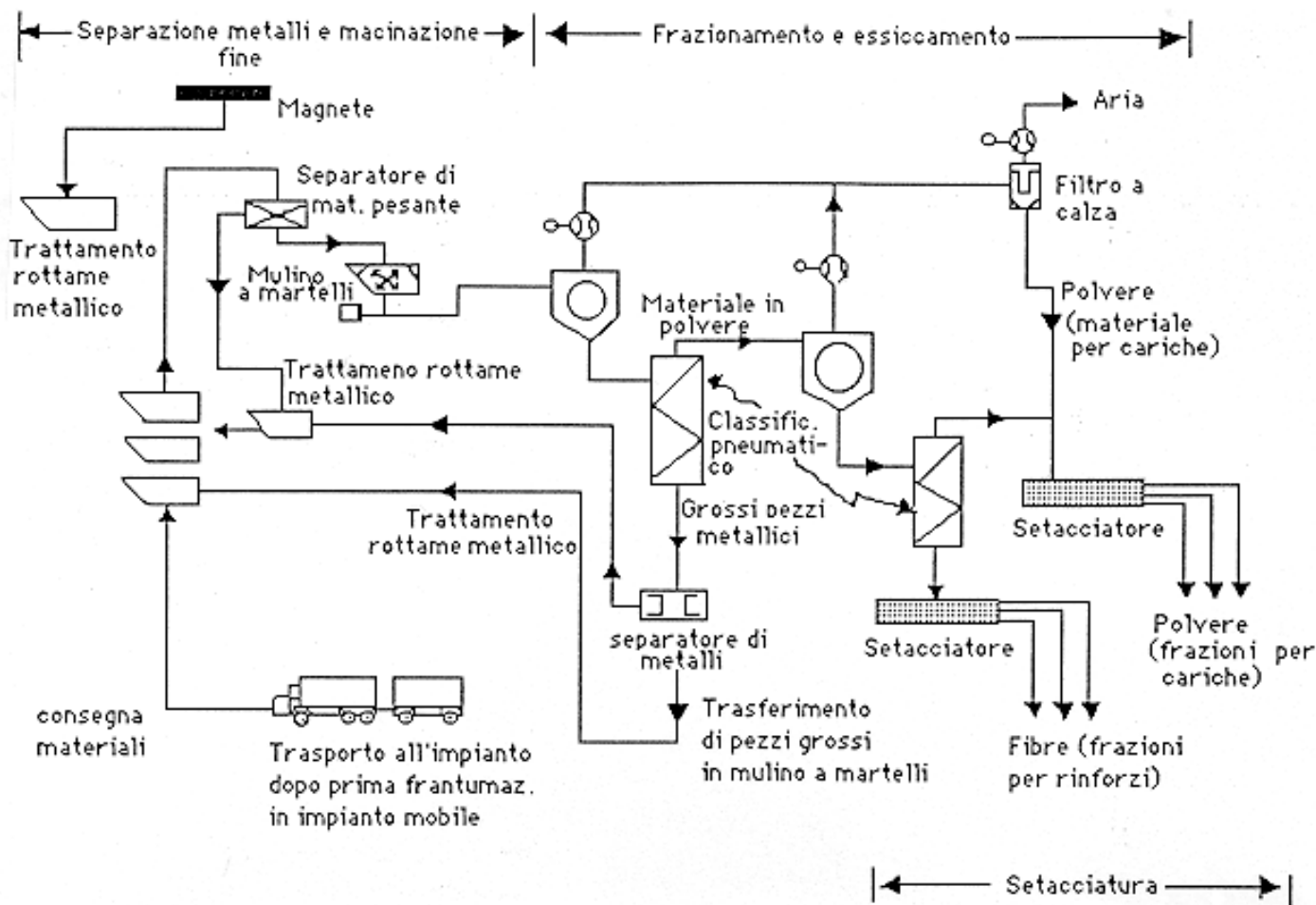



Fig. 45 Ciclo di lavorazione di rifiuti di polimeri termoindurenti
La figura mostra il processo di riciclo di prodotti semilavorati a base di resine termoindurenti fibro-rinforzate. Si distinguono tre fasi principali: la separazione dei metalli e la macinazione, il frazionamento e l'essicamento del materiale macinato e la setacciatura di fibre e polveri (Leghissa, 1995, p. 46).

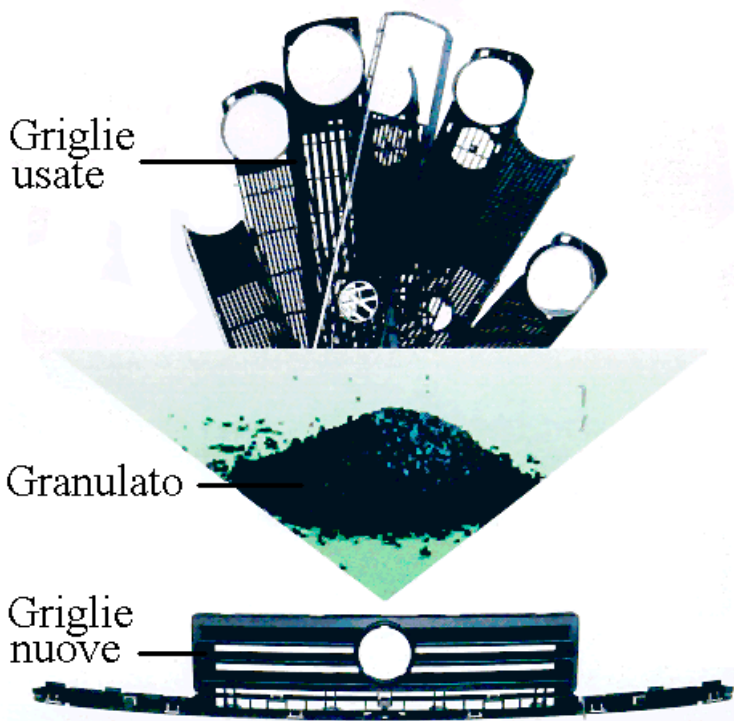



Fig. 46 Riciclo di griglie di radiatori per auto
La figura mostra le diverse fasi del riciclo di griglie per radiatori di autoveicoli Volkswagen realizzate in acrilonitrile/butadiene/stirene (ABS) (Bayer, 1994).

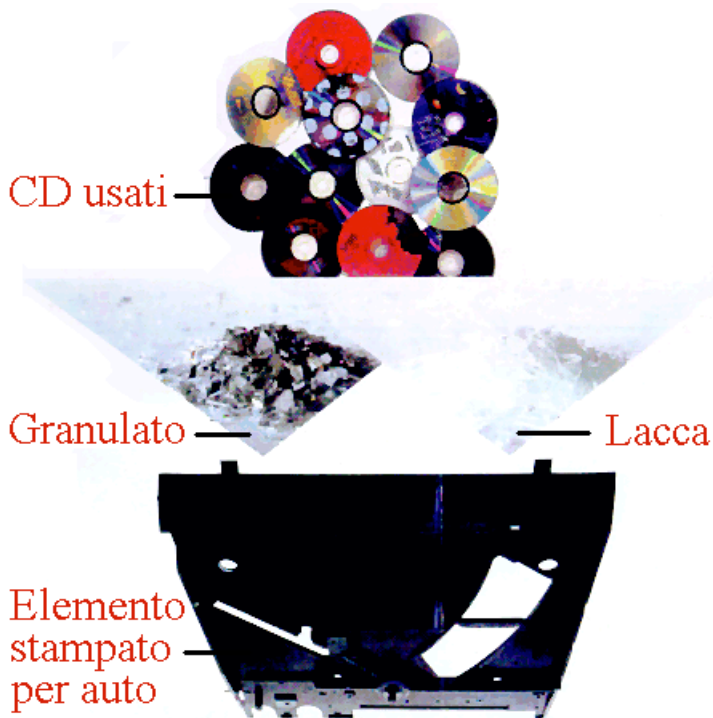



Fig. 47 Riciclo di compact discs
La figura mostra le diverse fasi del riciclo di compact discs realizzati in policarbonato (PC): dopo macinazione il prodotto riciclato viene utilizzato per realizzare componenti stampati per autoveicoli (Bayer, 1994).

Fig. 48 Riciclo di carrozzerie di fotocopiatrici
La figura mostra una delle fasi riguardanti il riciclo di carrozzerie di macchine fotocopiatrici realizzate in polifenilossido (PPO) (GE Plastics, 1993[1]).

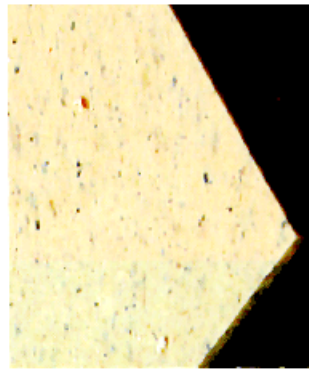



Fig. 49 Riciclo di polifenilossido (PPO)
La figura mostra le tre fasi del riciclo di polifenilossido (PPO) utilizzato per realizzare carrozzerie di macchine fotocopiatrici: i manufatti vengono sottoposti a una macinazione grossolana, quindi vengono ridotti in polvere e di seguito impiegati per realizzare lastre fibro-rinforzate (GE Plastics, 1989[2], p. 27).

Fig. 50 Riciclo di plastiche eterogenee

La figura mostra alcuni esempi di impiego di materie plastiche di riciclo eterogenee. Le principali applicazioni di questi materiali sono come: arredo urbano, pavimentazioni, recinzioni, attrezzature per giardini, parchi giochi, pontili e approdi (Coges, 1996, p. 21).

Fig. 51 Riciclo di plastiche eterogenee
La figura mostra alcuni esempi di impiego di materie plastiche di riciclo eterogenee. Le principali applicazioni di questi materiali sono come: arredo urbano, pavimentazioni, recinzioni, attrezzature per giardini, parchi giochi, pontili e approdi (EVC, 1991, p. 18).

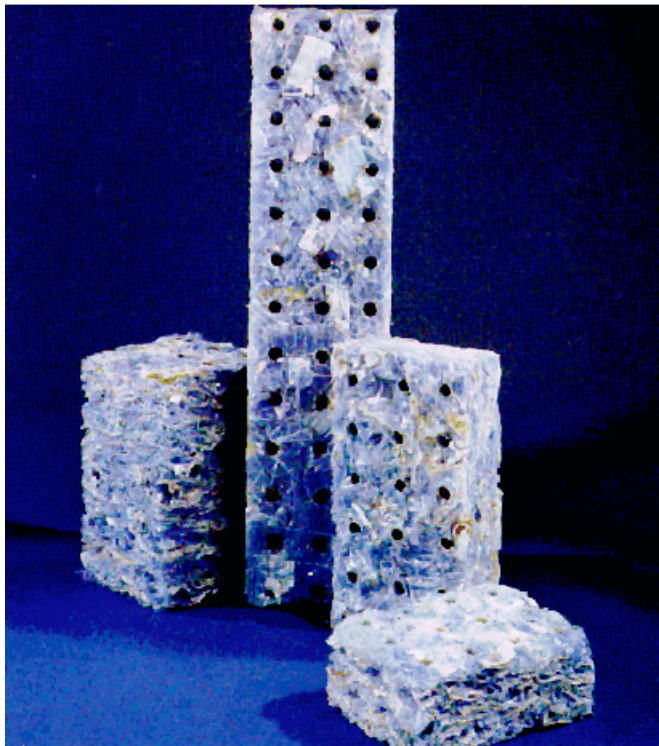



Fig. 52 Stabilobloc
La figura mostra i blocchi ottenuti da rifiuti plastici indifferenziati pressati, prodotti e commercializzati dall'azienda belga Stabilobloc (Stabilobloc, 1996[2]).

Fig. 53 Sottofondi stradali con Stabilobloc

La figura mostra una delle possibili applicazioni dei blocchi Stabilobloc, applicazione che sfrutta la capacità vibro-assorbente di questi manufatti per stabilizzare i sottofondi stradali realizzati su terreni comprimibili (Stabilobloc, 1996[2]).

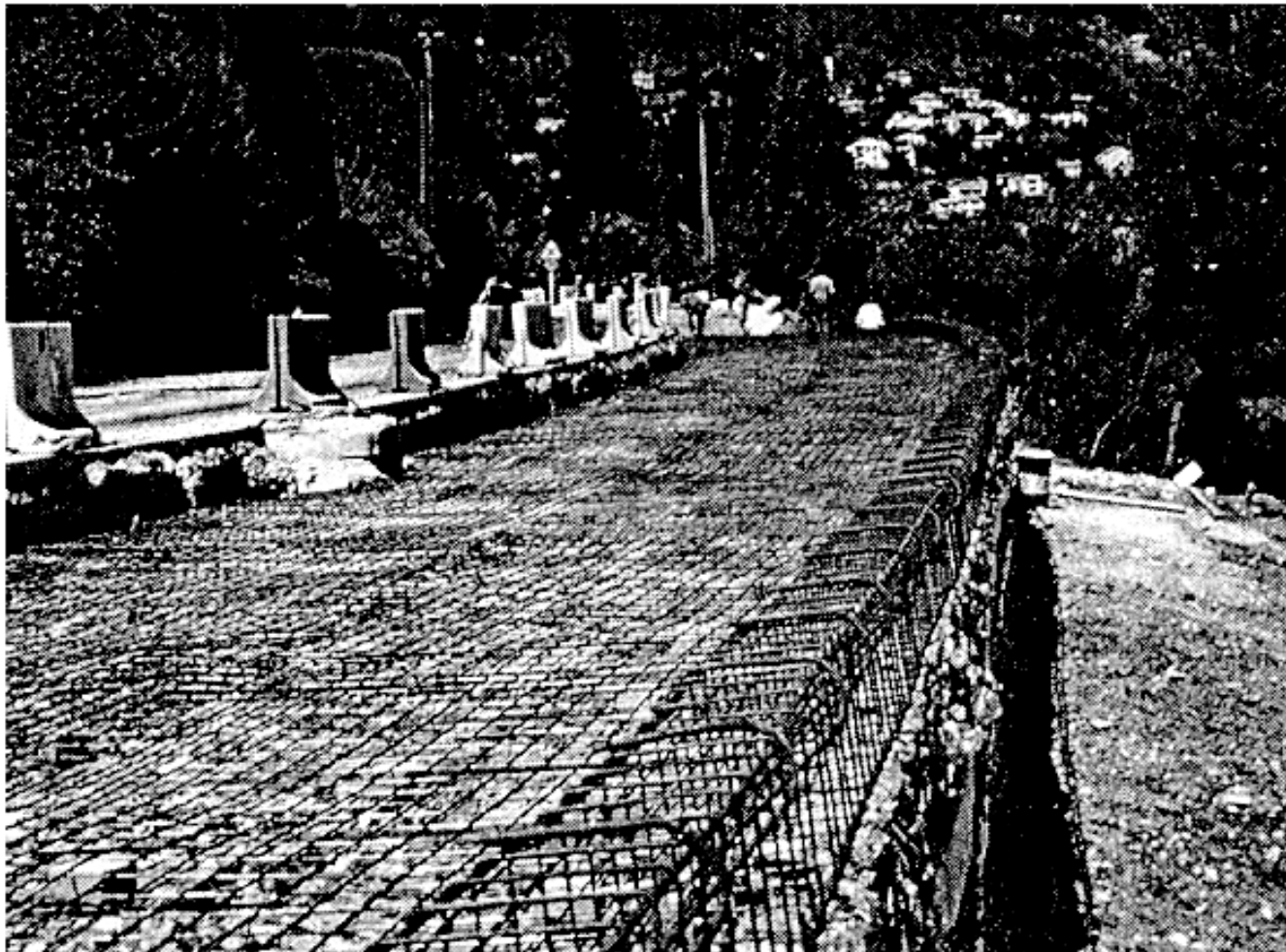



Fig. 54 Sottofondi stradali con Stabilobloc
La figura mostra una delle possibili applicazioni dei blocchi Stabilobloc, applicazione che sfrutta la capacità vibro-assorbente di questi manufatti per stabilizzare i sottofondi stradali realizzati su terreni comprimibili (AA.VV., 1995[14]).

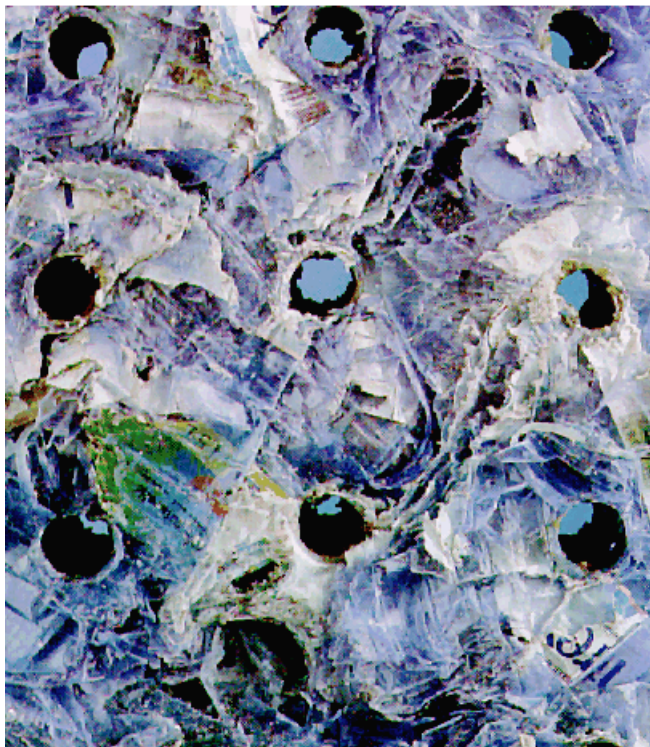



Fig. 55 Stabilobloc
La figura mostra il particolare dei fori realizzati nei blocchi Stabilobloc: questi fori permettono di assorbire le deformazioni trasversali del manufatto e, inoltre, ne agevolano la movimentazione (Stabilobloc, 1996[2]).

Fig. 56 Timbron
La figura mostra una applicazione dei profili laminati della serie Timbron, realizzati in polistirene (PS) riciclato e utilizzati per il rivestimento esterno di edifici (Timbron, 1996[2]).

Fig. 57 Timbron
La figura mostra una applicazione dei profili laminati della serie Timbron, realizzati in polistirene (PS) riciclato e utilizzati per il rivestimento esterno di edifici (Timbron, 1996[2]).

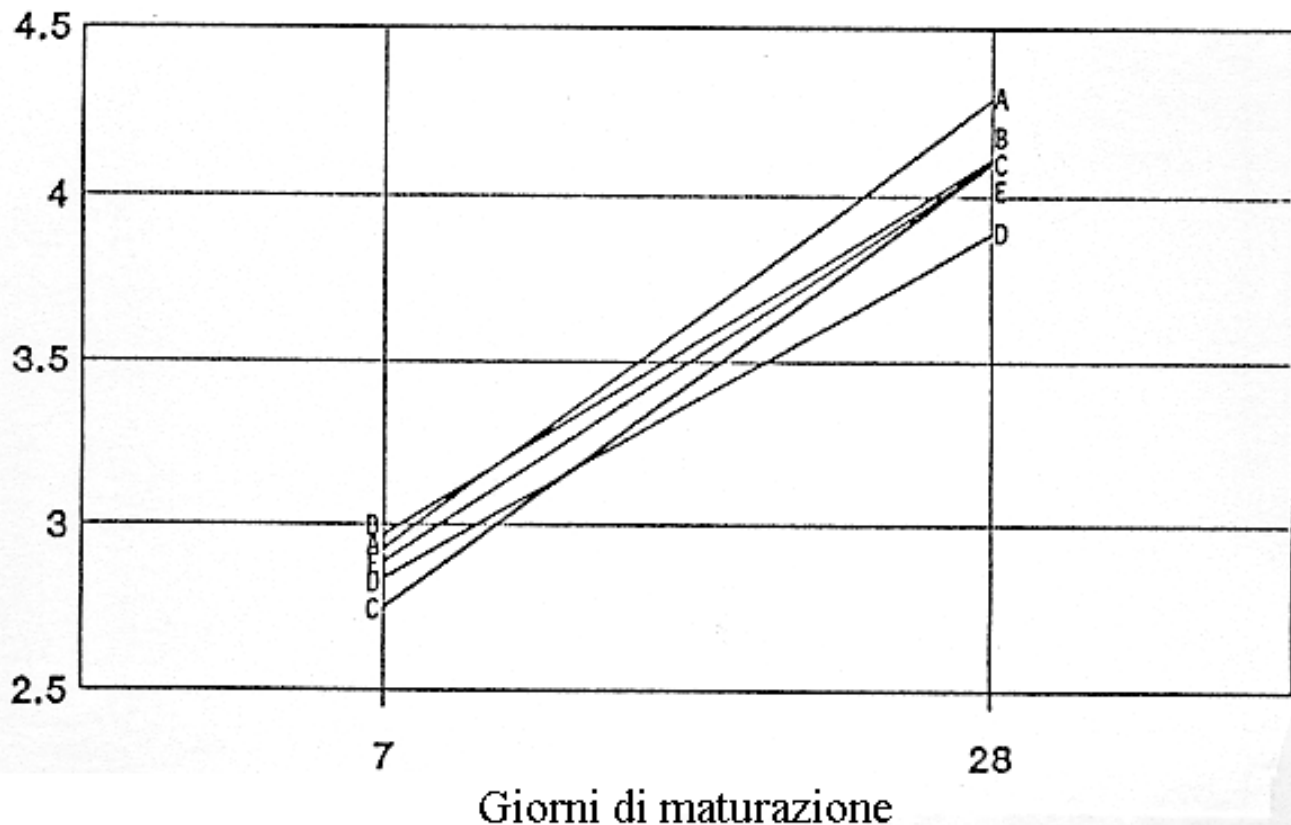



Fig. 58 Calcestruzzo polimerico - resistenza a compressione
Il diagramma mostra l'andamento dei valori di resistenza a compressione (7 - 28 giorni di maturazione) di provini di calcestruzzo di cemento portland contenenti 0.1 % di fibre di polietilene ad alta densità (HDPE) di riciclo (curva A), lo 0.2 % del medesimo polimero (curva B), 0.1 % di fibre di polipropilene (PP) vergine (curva D), lo 0.2 % del medesimo polimero (curva E), confrontati con un provino di riferimento non additivato (curva C). I valori sono espressi in PSI, tenuto conto che 1 PSI è uguale a 10^{-1} kg/cm^2 e a 10^{-2} N/mm^2 (Flynn, 1994, p. 529).

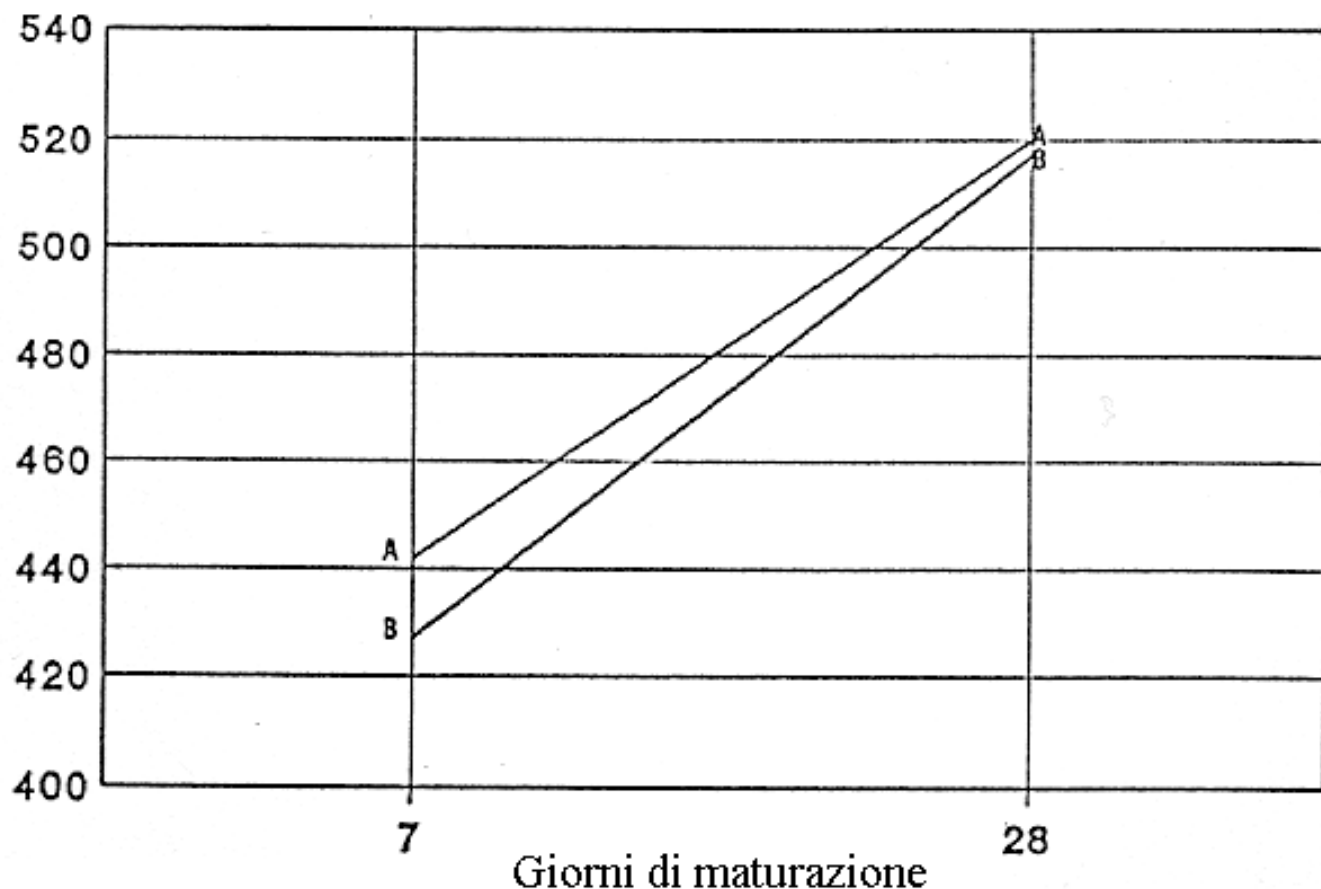



Fig. 59 Calcestruzzo polimerico - resistenza a flessione
Il diagramma mostra l'andamento dei valori di resistenza a flessione (7 - 28 giorni di maturazione) di provini di calcestruzzo di cemento portland contenenti 0.2 % di fibre di polietilene ad alta densità (HDPE) di riciclo (curva A), confrontati con un provino di riferimento non additivato (curva B). I valori sono espressi in PSI, tenuto conto che 1 PSI è uguale a 10^{-1} kg/cm^{2} e a 10^{-2} N/mm^{2} (Flynn, 1994, p. 530).

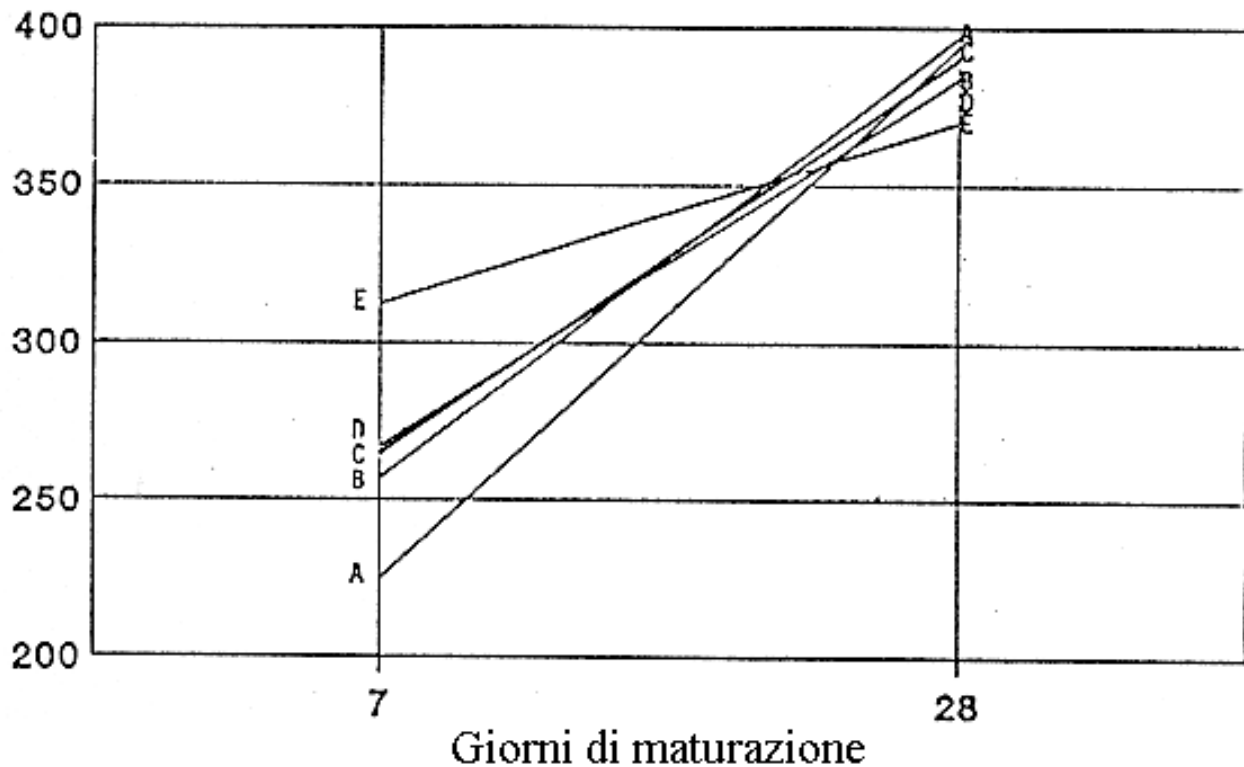



Fig. 60 Calcestruzzo polimerico - resistenza a trazione
Il diagramma mostra l'andamento dei valori di resistenza a trazione (7 - 28 giorni di maturazione) di provini di calcestruzzo di cemento portland contenenti 0.1 % di fibre di polietilene ad alta densità (HDPE) di riciclo (curva A), lo 0.2 % del medesimo polimero (curva B), 0.1 % di fibre di polipropilene (PP) vergine (curva D), lo 0.2 % del medesimo polimero (curva E), confrontati con un provino di riferimento non additivato (curva C). I valori sono espressi in PSI, tenuto conto che 1 PSI è uguale a 10^{-1} kg/cm^2 e a 10^{-2} N/mm^2 (Flynn, 1994, p. 531).

Fig. 61 Riciclo serramenti in polivinilcloruro (PVC)
La figura mostra le fasi del riciclo di serramenti in polivinilcloruro (PVC), serramenti che vengono dapprima frantumati e, di seguito, macinati e frazionati in diverse granulometrie (EVC, 1991, p. 22).

Fig. 62 Pannelli coestrusi con polivinilcloruro (PVC) riciclato

La figura mostra una applicazione di pannelli sandwich, realizzati per coestrusione di polimero riciclato e vergine nello strato esterno e materiale espanso nella parte interna, utilizzati come tramezzi divisori per un parcheggio esterno per autoveicoli (Simona, 1994).

Fig. 63 Scarti di camere d'aria per pneumatici
La figura mostra le camere d'aria per pneumatici prima di essere inviate alle operazioni di riciclo (Vredestein, 1996).

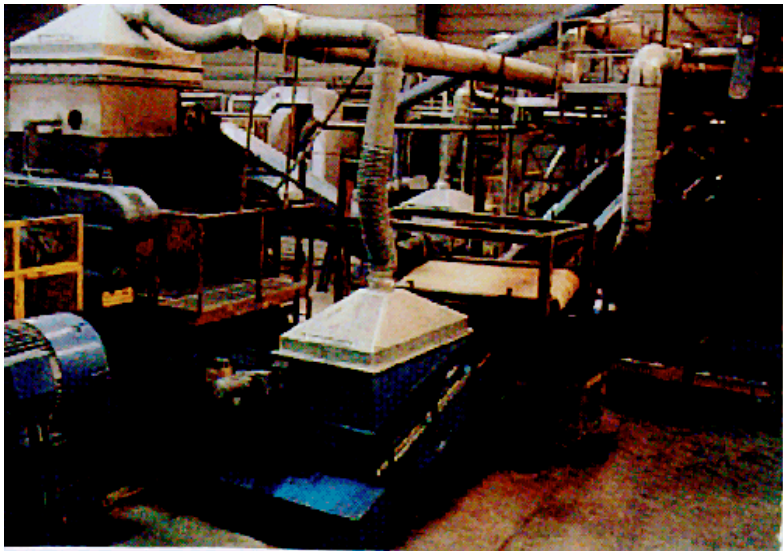



Fig. 64 Riciclo di pneumatici
La figura mostra l’impianto di polverizzazione, purificazione e rigenerazione di gomme provenienti da pneumatici di autoveicoli (Vredestein, 1996).

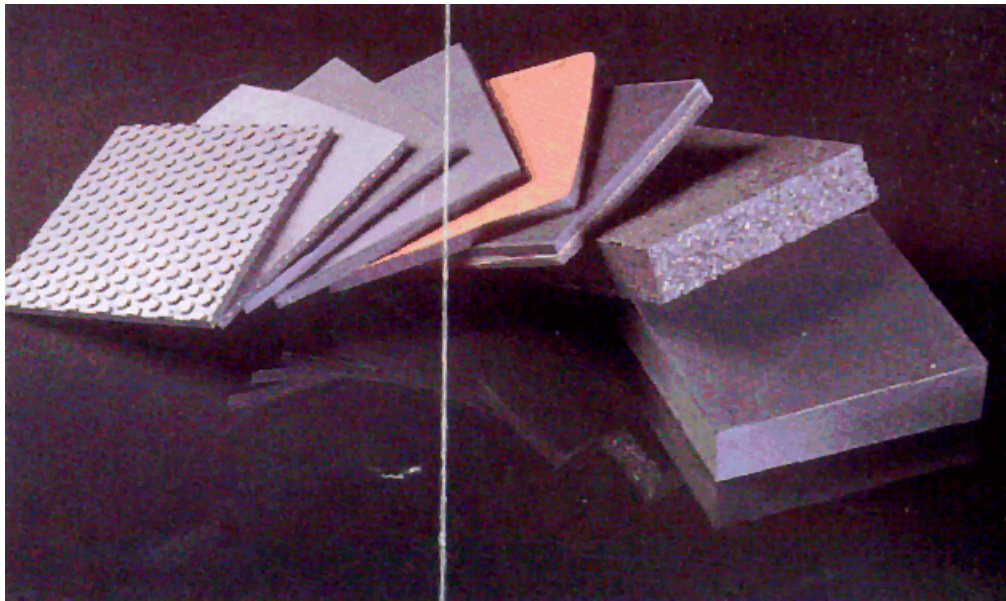



Fig. 65 Manufatti in gomma riciclata

La figura mostra alcuni tipi di lastre per pavimentazione ottenute da gomma riciclata proveniente da pneumatici dismessi (Vedrestein, 1996).

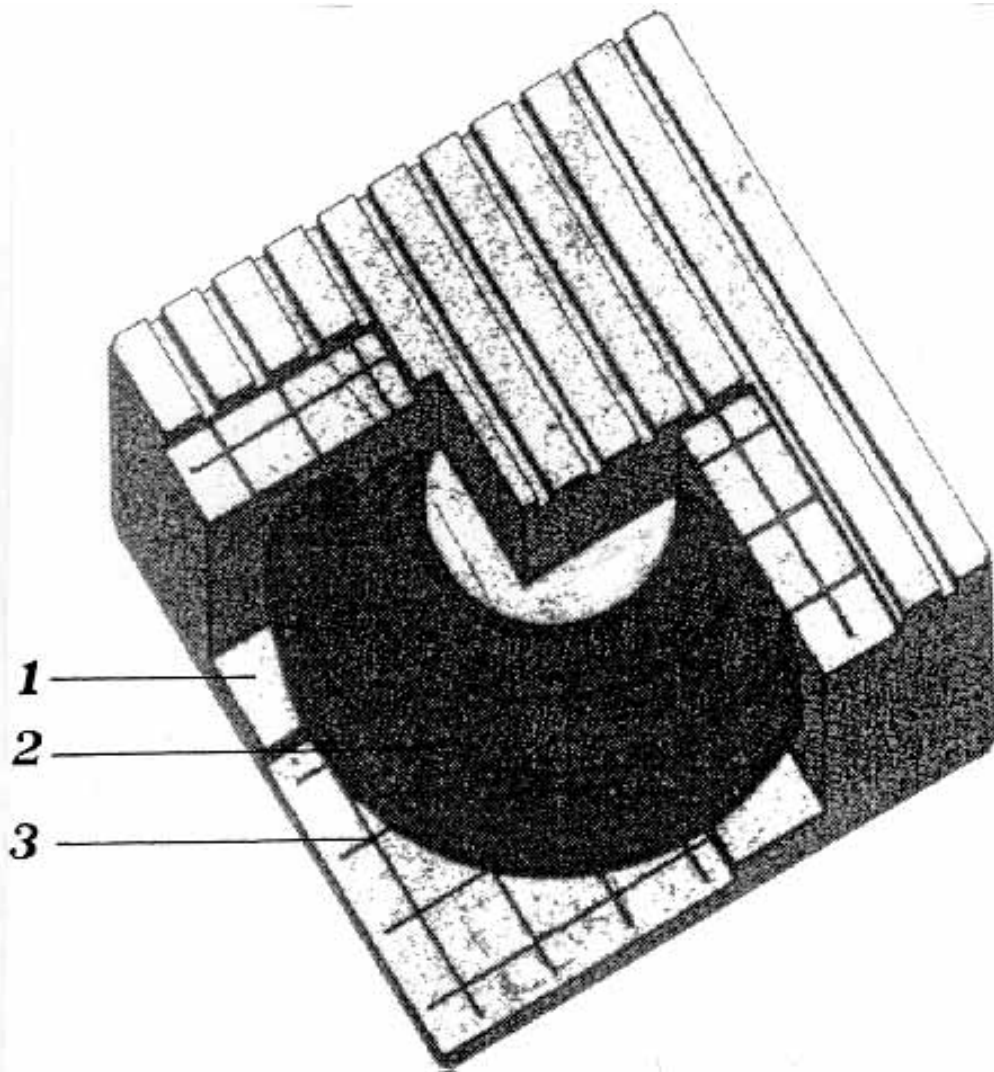



Fig. 66 Blocchi per pavimentazione esterna
La figura mostra un blocco in calcestruzzo per pavimentazione esterna ottenuto inglobando nel getto (3), rinforzato con una rete elettrosaldata (1), un pneumatico dismesso (2) (Baglioni, et alii, 1994, p. 504).

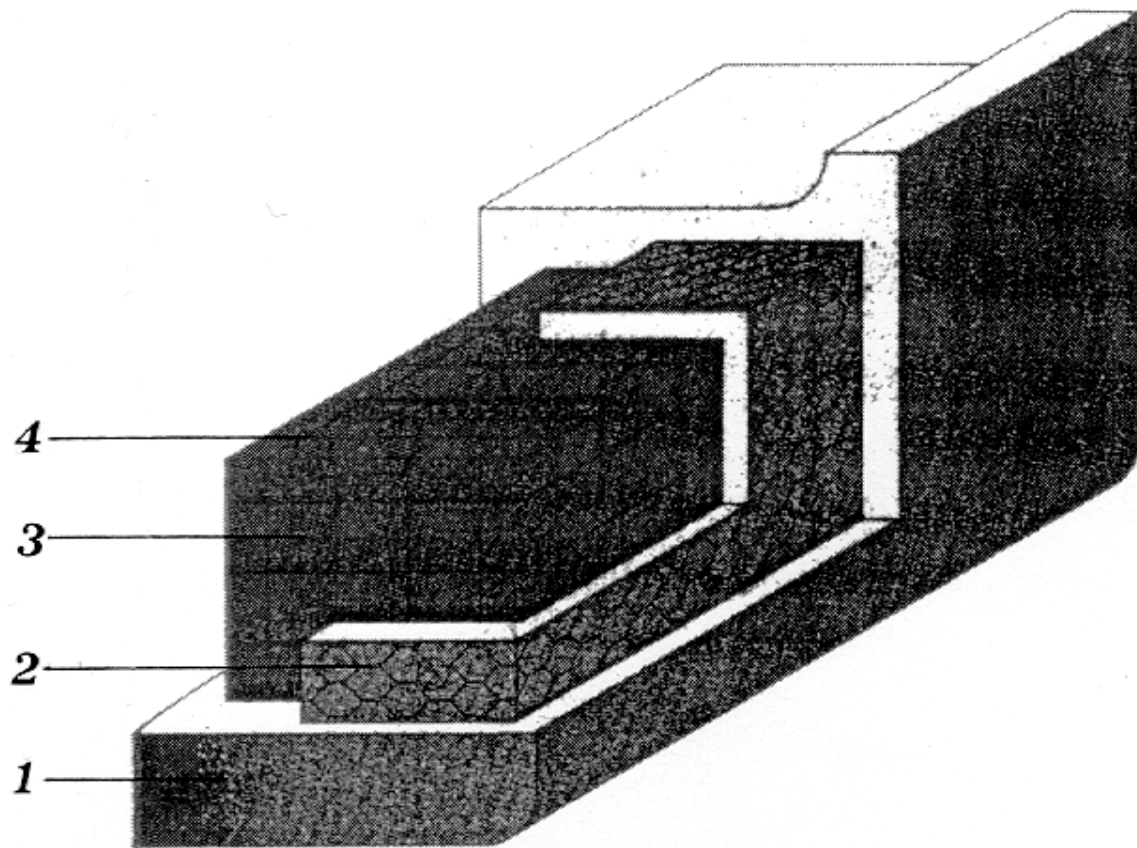



Fig. 67 Blocchi per pareti di contenimento
La figura mostra un blocco in calcestruzzo per pareti di contenimento ottenuto inglobando nel getto (1), rinforzato con rete elettrosaldata (2), una anima di gomma riciclata pressata (4) rivestita con rete d'acciaio (3) (Baglioni, et alii, 1994, p. 503).

Fig. 68 Elementi di copertura in polifenilossido (PPO) riciclato

La figura mostra alcuni elementi di copertura, ottenuti da polifenilossido (PPO) riciclato, nei quali è stata riprodotta per stampaggio a iniezione la venutura del legno di cedro (Royal - Bigmar, 1996).

Fig. 69 Elementi di copertura in polifenilossido (PPO) riciclato

La figura mostra una applicazione di elementi di copertura in polifenilossido (PPO) riciclato, riprodotti con la venatura del legno di cedro (GE Plastics, 1995[2]).

Fig. 70 Elementi di copertura in polifenilossido (PPO) riciclato

La figura mostra alcuni elementi di copertura, ottenuti da polifenilossido (PPO) riciclato, nei quali è stata riprodotta per stampaggio a iniezione la forma della tegola spagnola (Royal - Bigmar, 1996).

Fig. 71 Elementi di copertura in polifenilossido (PPO) riciclato

La figura mostra una applicazione di elementi di copertura in polifenilossido (PPO) riciclato, riprodotti con la forma della tegola spagnola (GE Plastics, 1995[3]).

Fig. 72 Elementi di rivestimento in polifenilossido (PPO) riciclato
La figura mostra una applicazione di elementi di rivestimento esterno in polifenilossido (PPO) riciclato, riprodotti per stampaggio a iniezione con la venatura del legno di cedro (Royal - Bigmar, 1996).

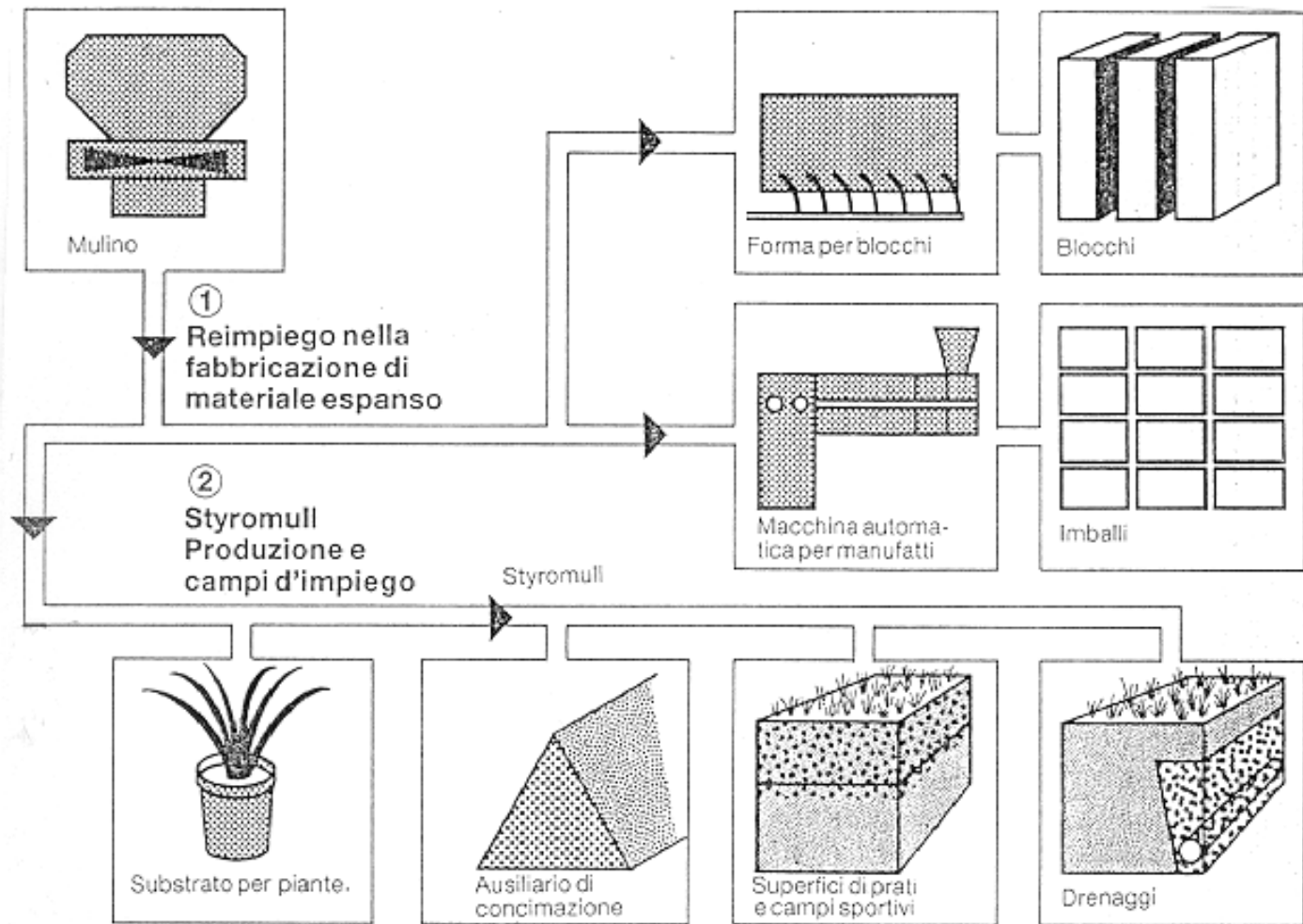



Fig. 73 Esempi applicativi di polistirene espanso (EPS) riciclato
La figura mostra le applicazioni di polistirene espanso (EPS) riciclato: questo materiale è impiegato come alleggerimento e carica isolante per blocchi in calcestruzzo e in laterizio, oppure come agente drenante o riempitivo per terreni (Basf, 1990).

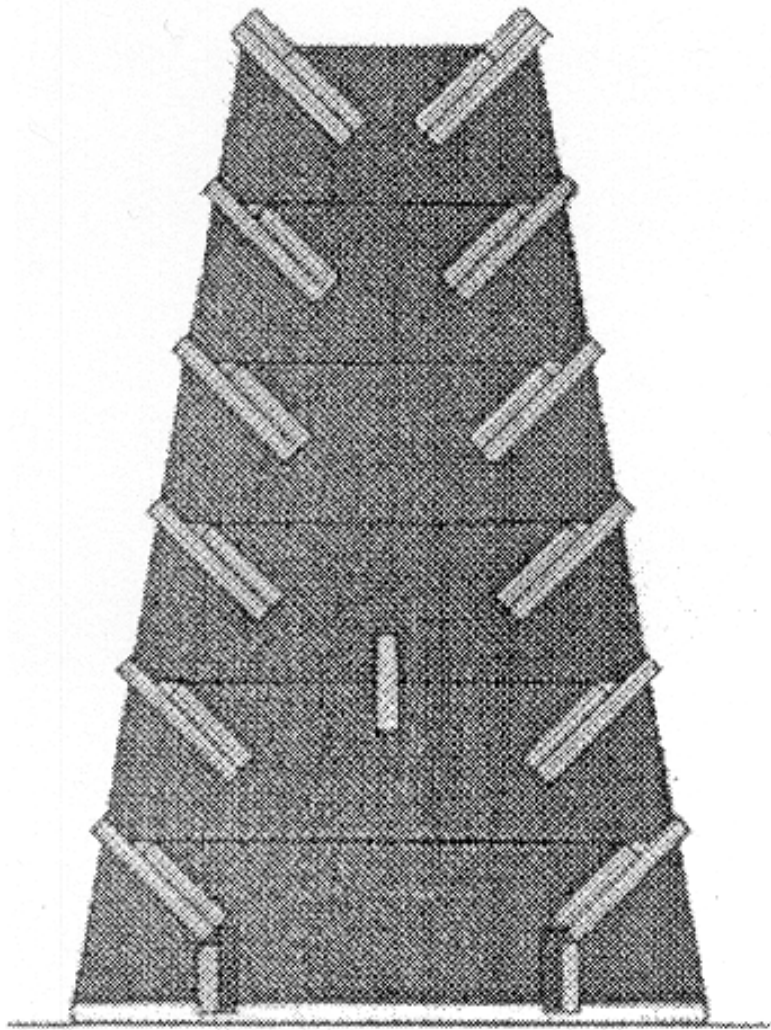



Fig. 74 Barriera fonica - sezione trasversale
La figura mostra la sezione trasversale di una barrira fonica ottenuta con elementi estrusi in pastica riciclata eterogenea (Piardi, et alii, 1994, p. 513).

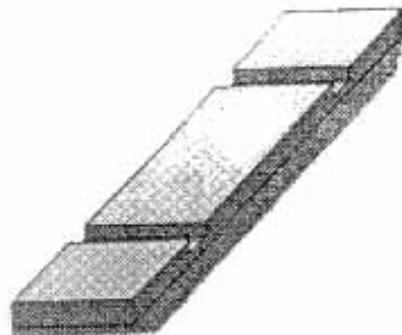
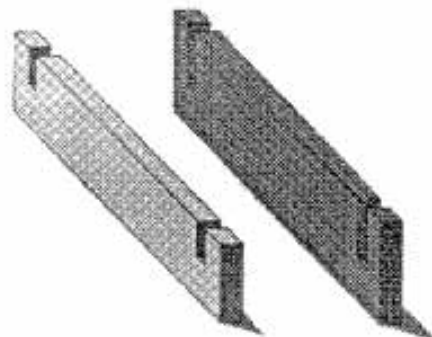
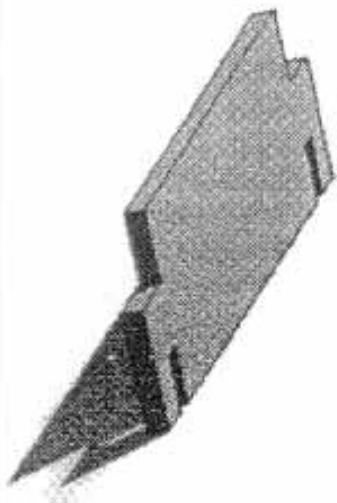
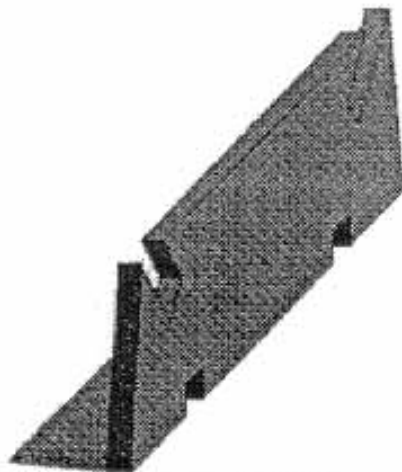
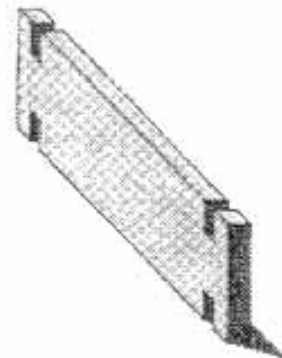



Fig. 75 Barriera fonica - elementi costruttivi
La figura mostra gli elementi-base utilizzabili per il montaggio della barriera fonica. Si tratta di lastre estruse di varia dimensione con intagli fresati per mezzo dei quali le lastre si incastrano l'una nell'altra. Gli elementi sono: basamento trasversale ("runner"), basi della parete ("bases of the wall a/b), lato (side), elemento inclinato ("sloping element"), rinforzo longitudinale ("brace") (Piardi, et alii, 1994, p. 512).

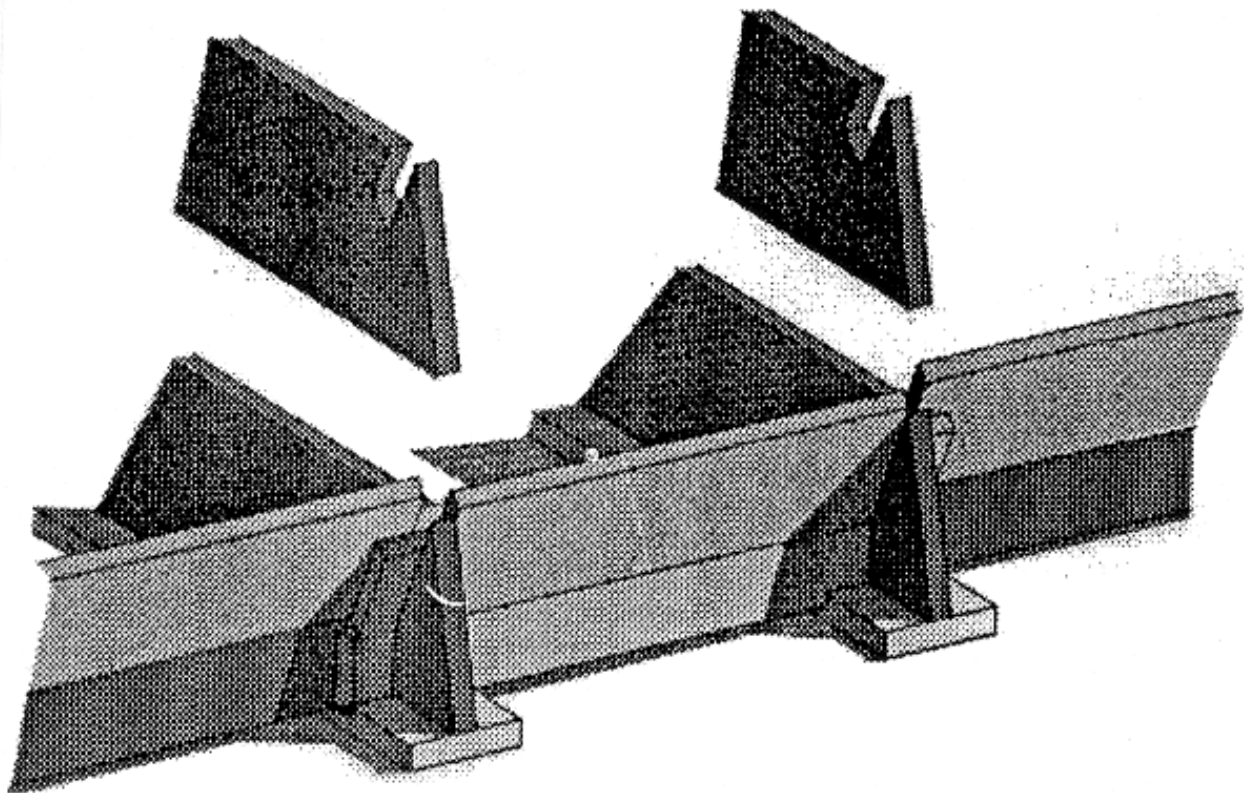



Fig. 76 Barriera fonica - assemblaggio
La figura mostra le operazioni per l'assemblaggio per incastro degli elementi costituenti la barriera fonica in plastica riciclata eterogenea (Piardi, et alii, 1994, p. 513).

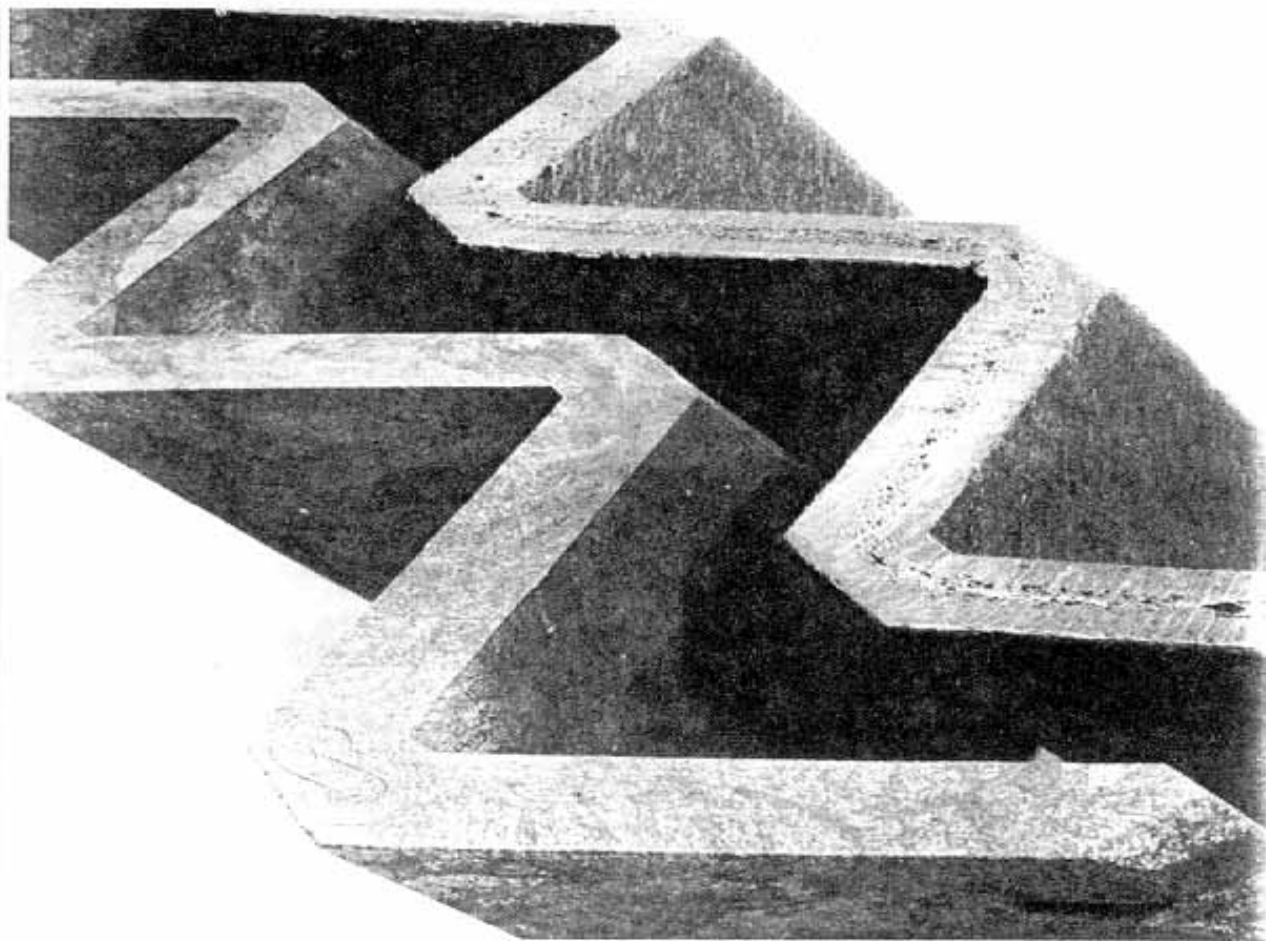



Fig. 77 Multi-brick
La figura mostra un particolare degli elementi estrusi in plastica riciclata eterogenea utilizzati per realizzare barriere foniche (AA.VV.,1995[5], p. 18).

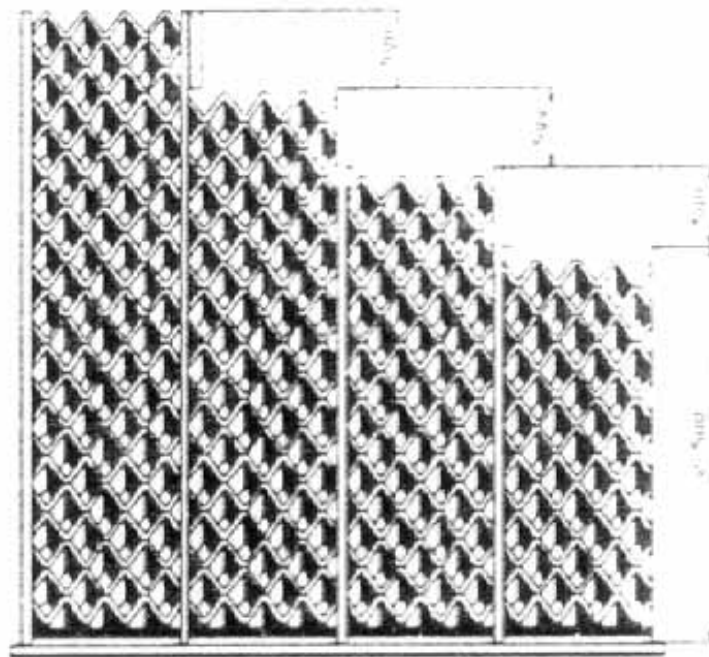
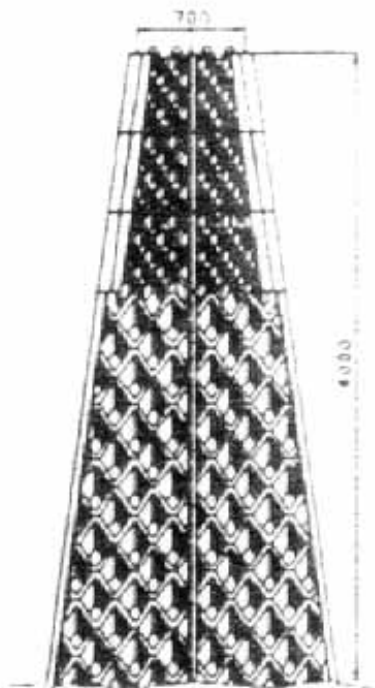



Fig. 78 Multi-brick - schema costruttivo
La figura mostra lo schema costruttivo delle barriere foniche con il sistema Multi-brick: gli elementi vengono sovrapposti uno all'altro con interposto terreno di coltura (AA.VV.,1995[5], p. 18).

Fig. 79 Riciclo cavi in polivinilcloruro (PVC)
La figura mostra le operazioni di riciclo con le quali si ottiene polivinilcloruro (PVC) granulato partendo da cavi elettrici e telefonici dismessi (EVC, 1991, p. 20).

Fig. 80 Nuovi prodotti da riciclo cavi in polivinilcloruro (PVC)
La figura mostra alcuni dei prodotti ottenuti utilizzando polivinilcloruro (PVC) riciclato da cavi elettrici e telefonici. Si tratta tappettini, strati di rinforzo per pavimentazioni e guaine per nuovi cavi (EVC, 1991, p. 20).

Fig. 81 Riciclo pavimentazioni in polivinilcloruro (PVC)
La figura mostra le operazioni di riciclo di pavimentazioni dismesse in polivinilcloruro riciclato (EVC, 1991, p. 21).

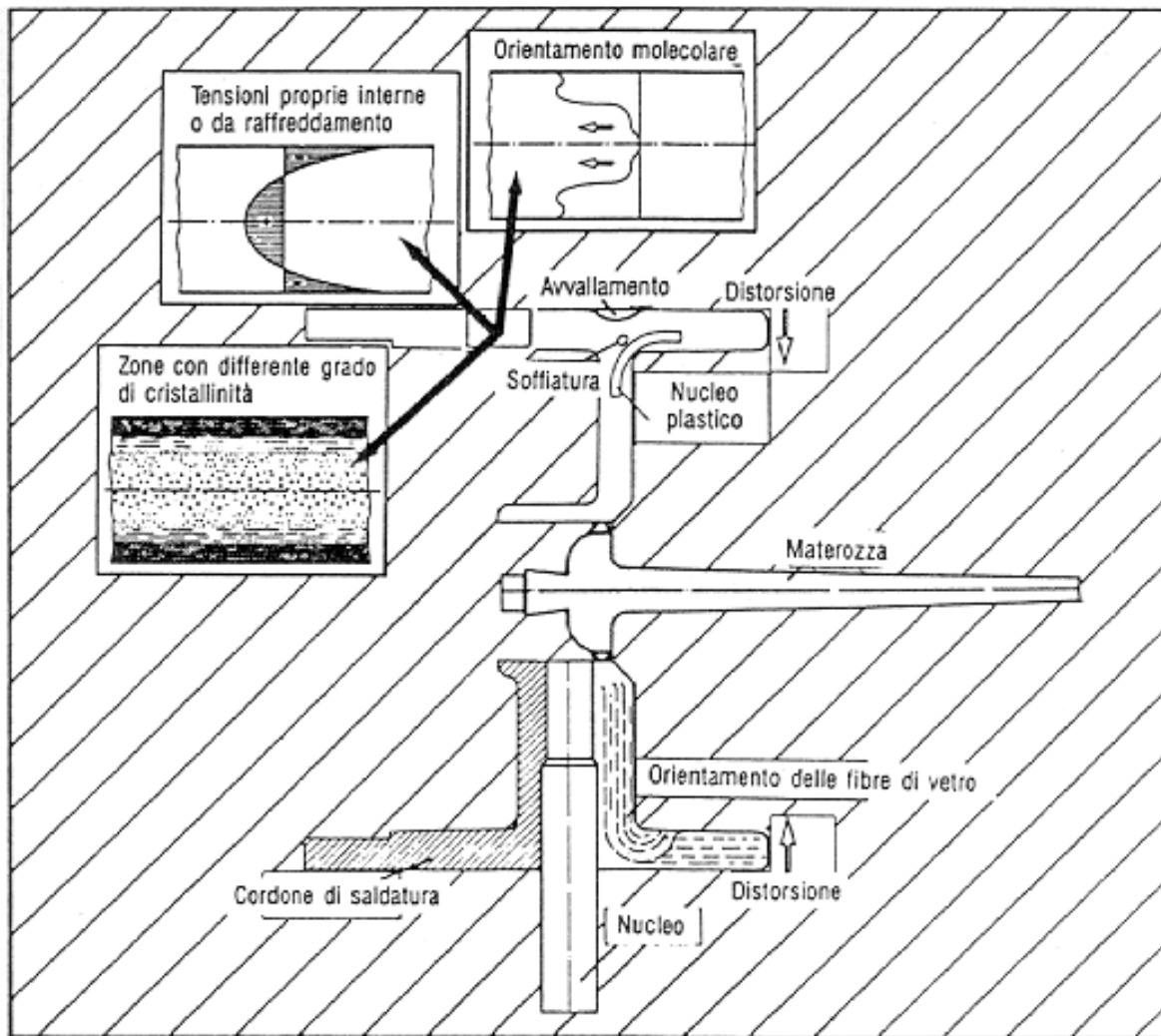



Fig. 82 Anisotropie da lavorazione

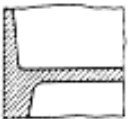
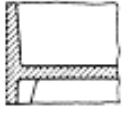
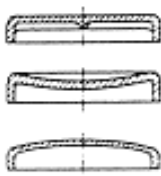
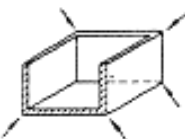
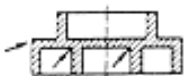
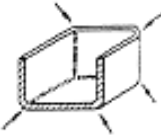
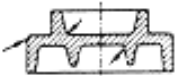
La figura mostra la schematizzazione delle anisotropie che possono insorgere in un manufatto in materia plastica durante la sua lavorazione. Questi stati di autotensione sono dovuti a raffreddamenti differenziati, a differenti gradi di cristallinità delle molecole polimeriche e a differenti orientamenti molecolari (Oberbach, Muller, 1987, p. 10).

a) errato	b) corretto	note
		a) errato: piede pieno in tutta la lunghezza b) corretto: piede incavato
		a) errato: parete compatta b) corretto: parete incavata e nervata
		a) errato: superficie piatta si flette b) corretto: superficie nervata, ad arco accentuato verso l'interno o verso l'esterno
		a) errato: spigoli interni ed esterni affilati b) corretto: arrotondare gli spigoli interni ed esterni
		a) errato: bordo troppo spesso b) corretto: bordo spesso solo un poco di più della parete

Fig. 83 Esempi di progettazione con spessore uniforme

La figura mostra alcuni esempi di progettazione errata e corretta di pezzi stampati in materie plastiche, esempi che evidenziano l'importanza dell'uniformità dello spessore di parete nominale del componente (Saechtling, 1994, p. 67).

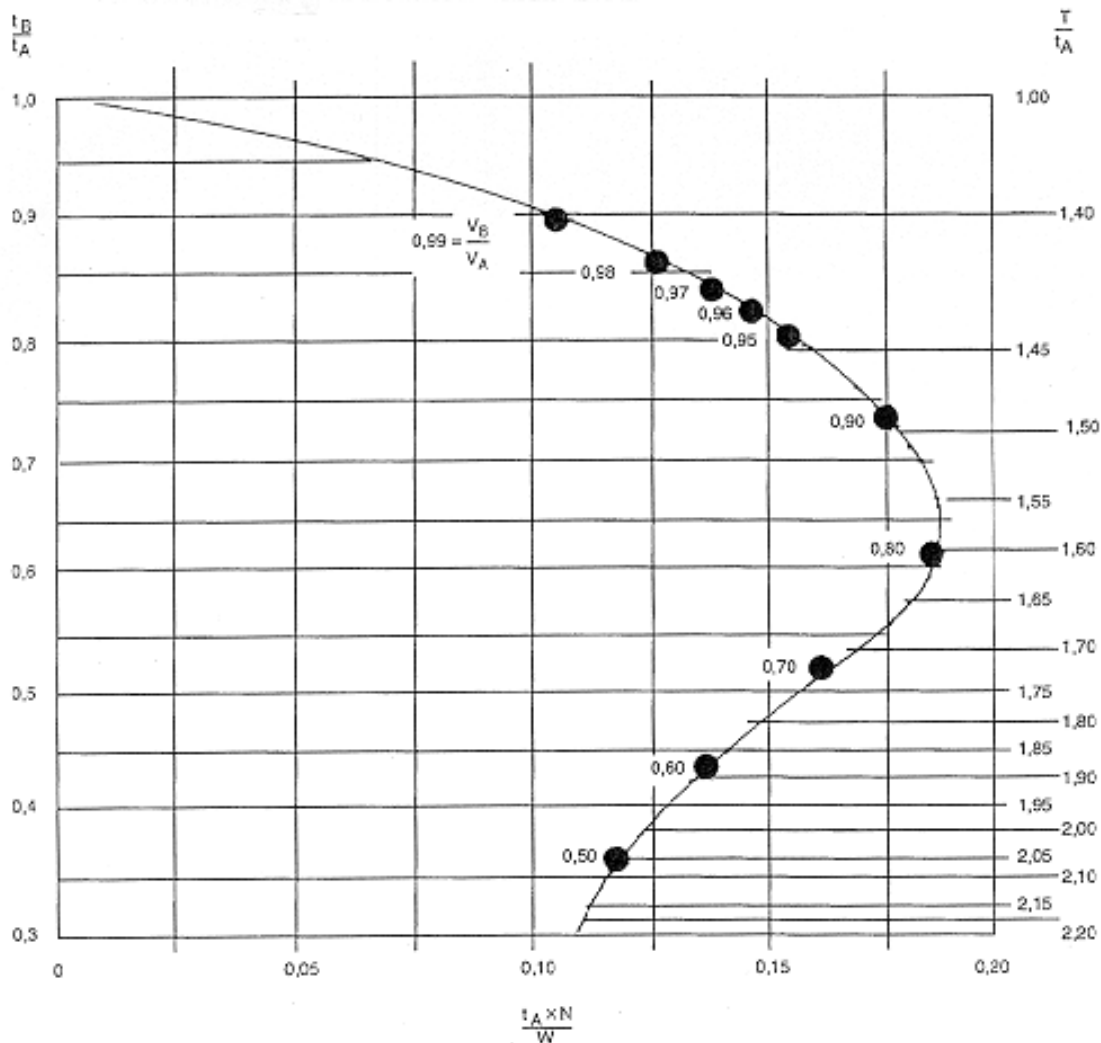



Fig. 84 Diagramma triassiale

La figura mostra il diagramma triassiale che descrive la relazione dimensionale tra una piastra piana e una piastra a nervature incrociate aventi il medesimo momento d'inerzia (Tav. 7). Sull'asse delle ascisse è riportato il rapporto (t_A* N) / W dove:

t_A (mm) è lo spessore della parete nominale della piastra non nervata;

N è il numero di nervature per millimetro;

W (mm) è la larghezza della piastra; questo valore è assunto uguale a 1.

Sull'asse sinistro delle ordinate è riportato il rapporto t_A / t_B dove:

t_B (mm) è lo spessore della parete nominale della piastra nervata.

t_A (mm)lo spessore della parete nominale della piastra non nervata.

Sull'asse destro delle ordinate è riportato il rapporto T / t_A dove:

T (mm) è lo spessore totale della piastra nervata.

t_A (mm) è lo spessore della parete nominale della piastra non nervata;

Lungo la curva, infine, sono riportati vari rapporti di volume V_B / V_A dove:

V_B (mm^3) è il volume della piastra nervata;

V_A (mm^3) è il volume della piastra piana.

Per ogni combinazione tra le variabili T, t_B, N, questi rapporti di volume specificano il minimo volume di materiale necessario per ottenere una struttura equivalente a quella non nervata (Dupont, 1990, p. 4.22).

Fig. 85 Piastre di inerzia equivalente
La figura mostra la sezione delle porzioni divisorie di una piastra piana e di una piastra nervata di rigidità equivalente dove:

t = T - 2H tan a;

A (area) = $B \cdot W + \dfrac{H \cdot (T + t)}{2}$;

W_D è lo spessore richiesto dalla verifica di deformazione;
W_S è lo spessore richiesto dalla verifica di resistenza;
(Dupont, 1990, p. 4.24).

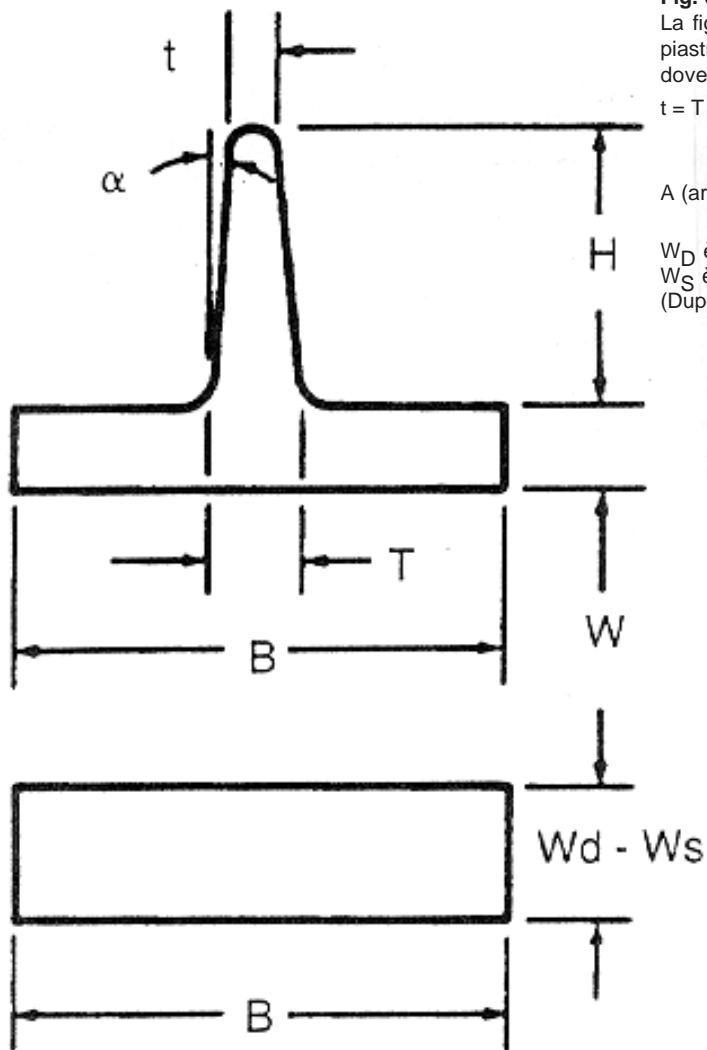
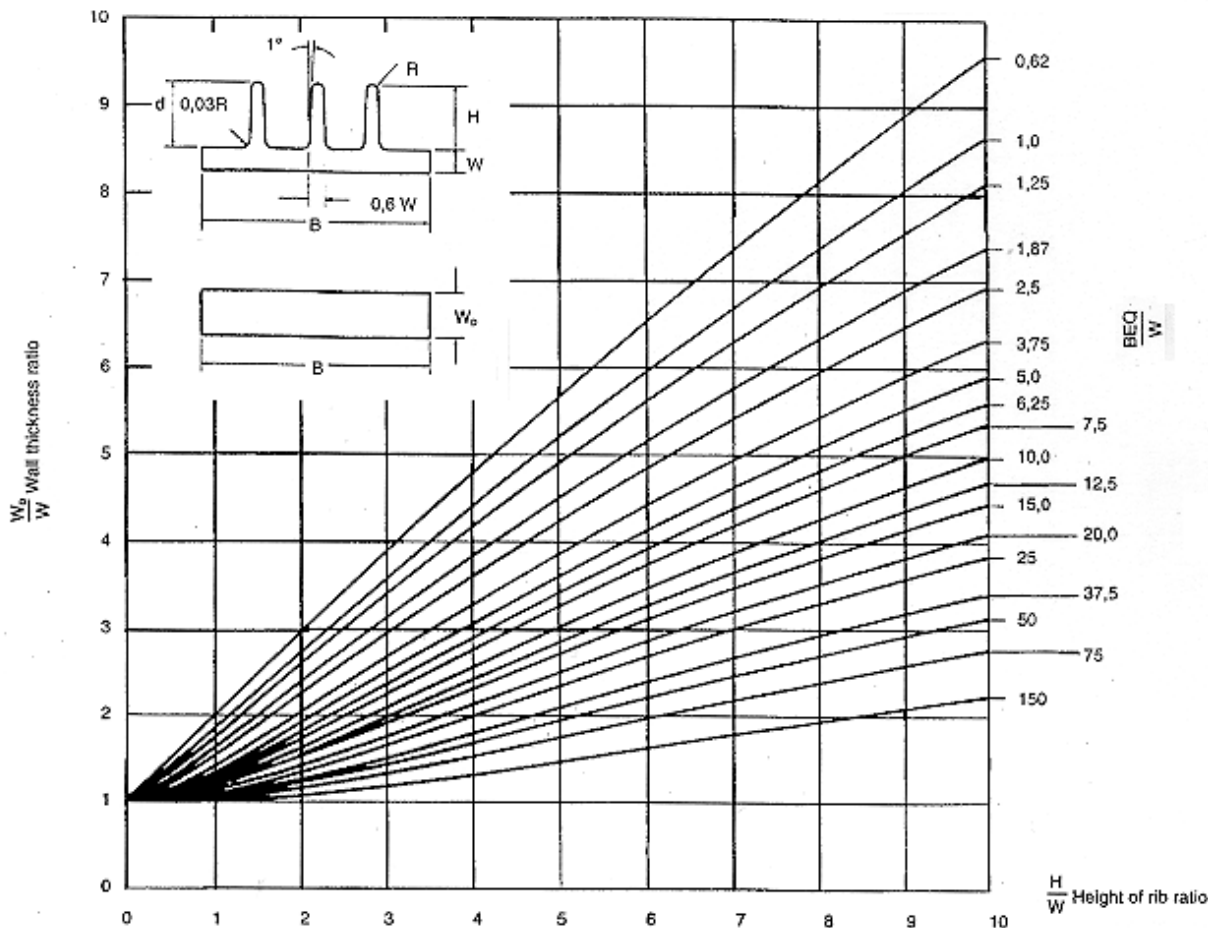



Fig. 86 Diagramma comportamento a deformazione
La figura mostra il diagramma relativo al comportamento a deformazione. Sull'asse delle ascisse è riportato il rapporto H / W dove:
H (mm) è l'altezza della nervatura;
W (mm) è lo spessore della parete nominale della piastra nervata.
Sull'asse sinistro delle ordinate è riportato il rapporto W_D / W dove:
W_D (mm) è lo spessore necessario a garantire i limiti di deformazione;
W (mm) è lo spessore della parete nominale della piastra nervata.
Sull'asse destro delle ordinate è riportato il rapporto BEQ / W dove:
BEQ è il rapporto B / N tra larghezza della sezione B (mm) e il numero delle nervature N;
W (mm) è lo spessore della parete nominale della piastra nervata.
(Dupont, 1990, p. 4.26).

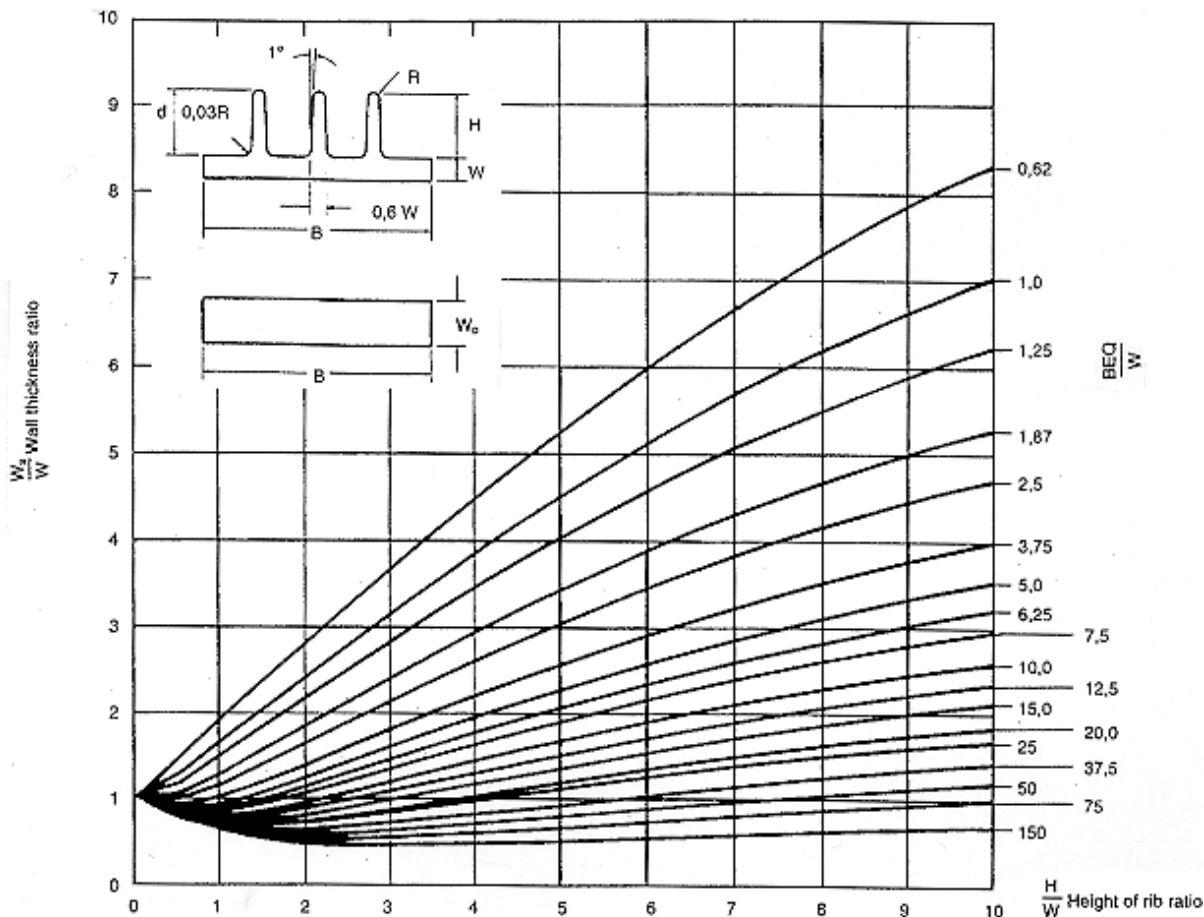



Fig. 87 Diagramma comportamento flessionale

La figura mostra il diagramma relativo al comportamento tensionale. Sull'asse delle ascisse è riportato il rapporto H / W dove:

H (mm) è l'altezza della nervatura;

W (mm) è lo spessore della parete nominale della piastra nervata.

Sull'asse sinistro delle ordinate è riportato il rapporto W_S / W dove:

W_S (mm) è lo spessore necessario a garantire la necessaria resistenza;

W (mm) è lo spessore della parete nominale della piastra nervata.

Sull'asse destro delle ordinate è riportato il rapporto BEQ / W dove:

BEQ è il rapporto B / N tra larghezza della sezione B (mm) e il numero delle nervature N;

W (mm) è lo spessore della parete nominale della piastra nervata.

(Dupont, 1990, p. 4.27).

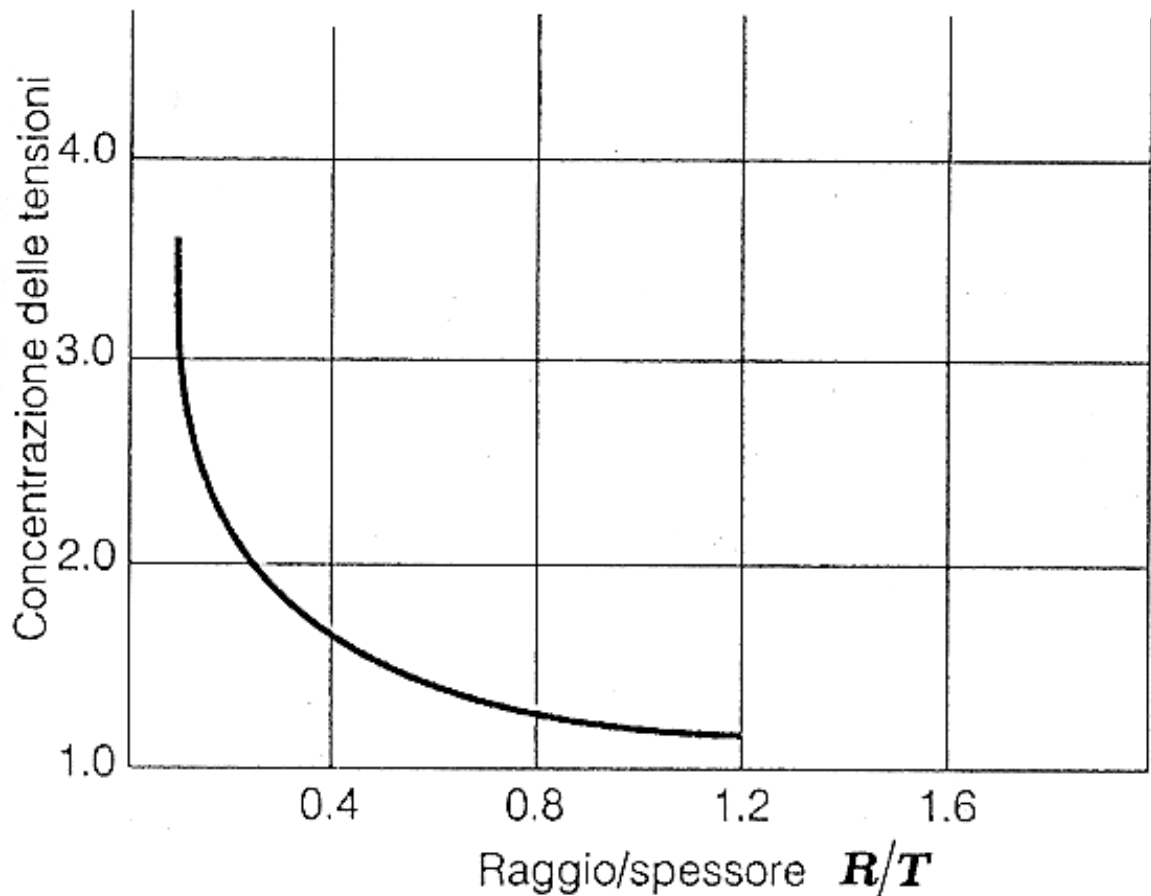



Fig. 88 Concentrazione delle tensioni
La figura mostra l’andamento del fattore di concentrazione delle tensioni (a_K) al variare del rapporto tra raggio (R) del raccordo tra due pareti e spessore (T) della parete nominale del componente (GE Plastics, 1994, p. 49).

Profondità in mm	Angolo di sformatura in gradi						
	⅛	¼	½	1	1½	2	3
10	0,022	0,044	0,087	0,17	0,26	0,35	0,52
20	0,044	0,087	0,175	0,35	0,52	0,70	1,04
30	0,065	0,131	0,26	0,51	0,78	1,05	1,56
40	0,087	0,175	0,35	0,68	1,04	1,4	2,08
50	0,109	0,218	0,43	0,85	1,3	1,75	2,6
60	0,131	0,262	0,52	1,02	1,56	2,1	3,12
70	0,153	0,305	0,61	1,2	1,82	2,45	3,64
80	0,174	0,349	0,69	1,36	2,1	2,8	4,16
90	0,196	0,392	0,78	1,53	2,34	3,15	4,68
100	0,218	0,436	0,87	1,7	2,6	3,5	5,2

Fig. 89 Angoli di sformatura
La figura mostra la relazione tra invito (I) e profondità (P) in una parete inclinata, necessaria per ottenere determinati angoli di sformatura (GE Plastics, 1989[1], p. 54).

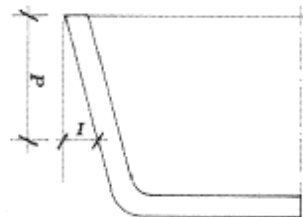
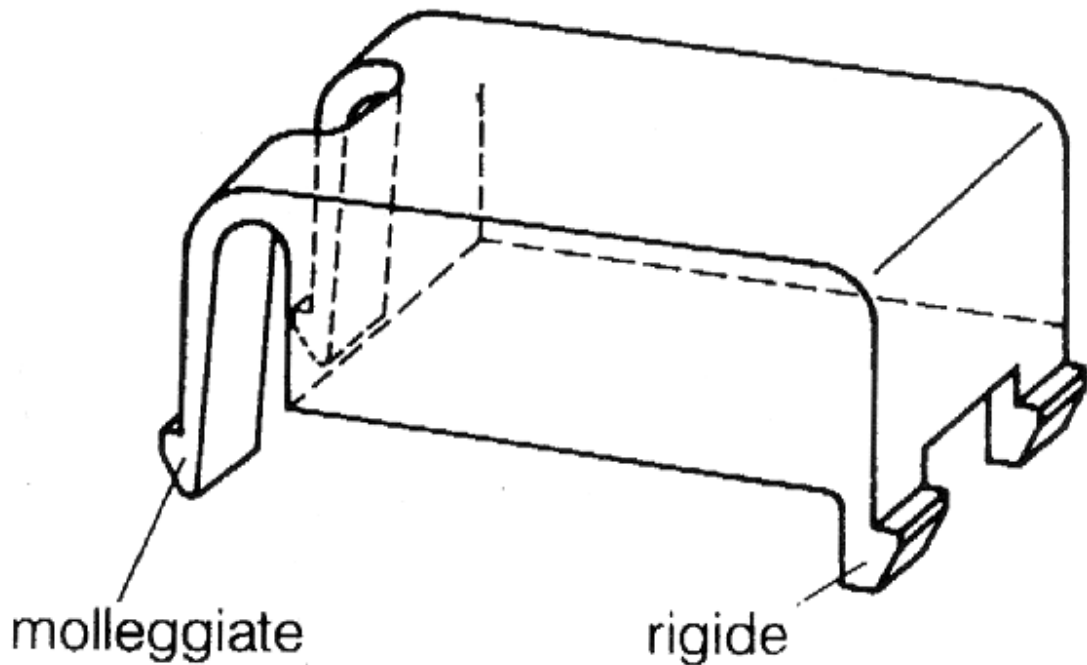



Fig. 90 Giunto a incastro elastico molleggiato e rigido
La figura mostra la differente lunghezza del giunto elastico rispetto al giunto rigido (Saechtling, 1993, p. 176).

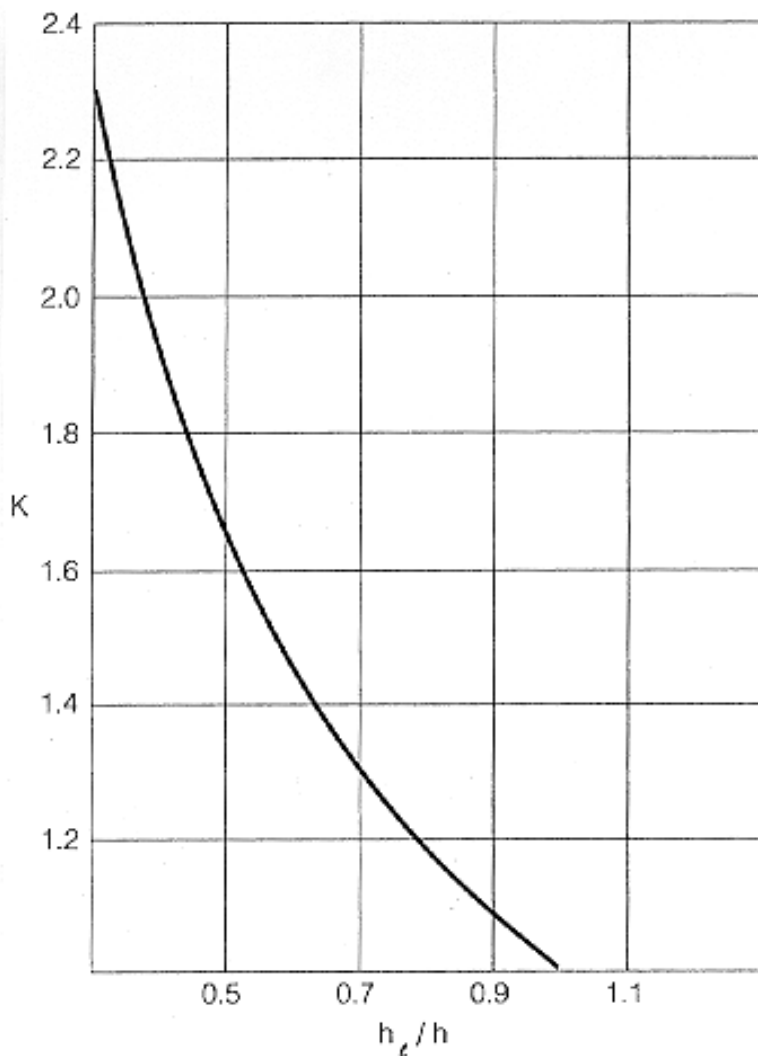



Fig. 91 Coefficiente di proporzionalità K
La figura mostra il diagramma relativo all’andamento del coefficiente di proporzionalità K in funzione del rapporto tra l’altezza della sezione rastremata all’estremità libera (h_l) e l’altezza della sezione all’attacco con la parete nominale del componente (h) (GE Plastics, 1994, p. 55).

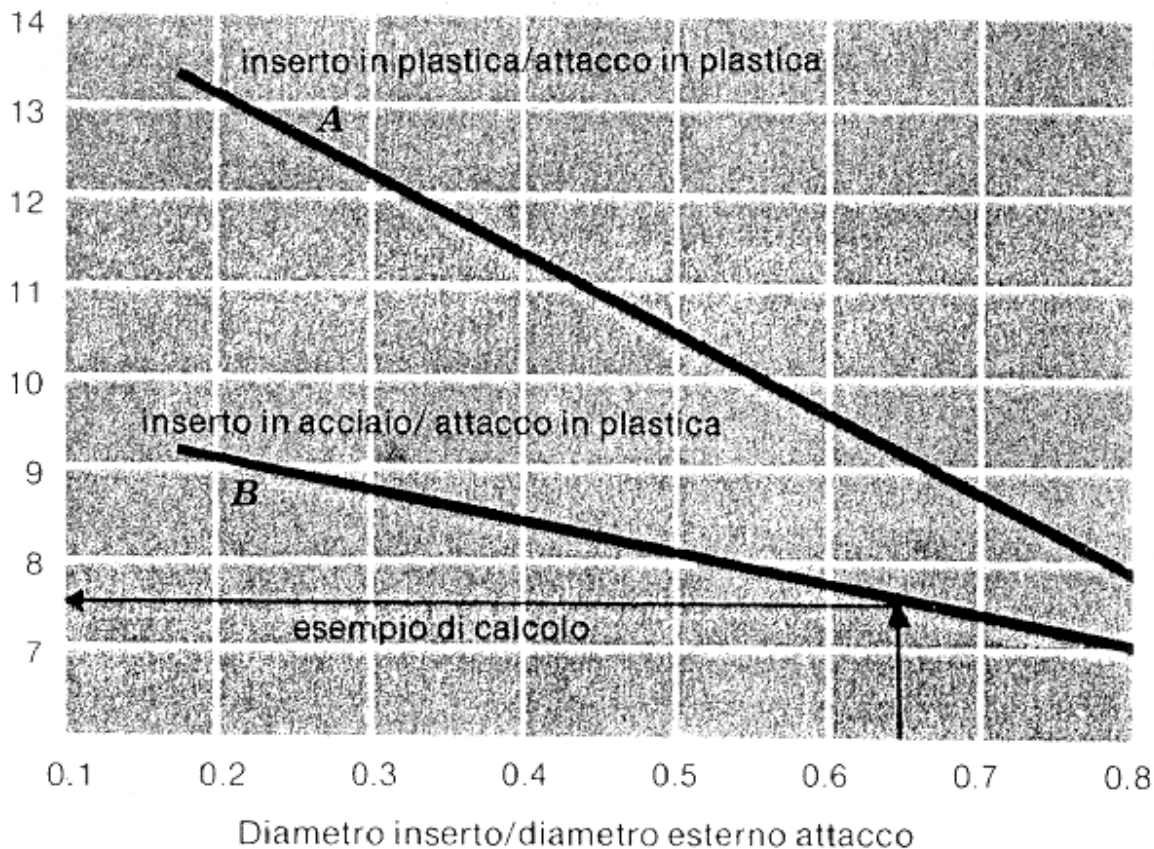



Fig. 92 Diagramma interferenze diametrali
La figura mostra i grafici relativi al rapporto tra diametro dello spinotto o inserto, diametro dell'attacco e interferenza diametrale massima in un giunto a pressione, sia nel caso che spinotto e attacco siano entrambi in plastica (A), sia nel caso che lo spinotto sia in acciaio e l'attacco in plastica (B) (GE Plastics, 1989[1], p. 61).

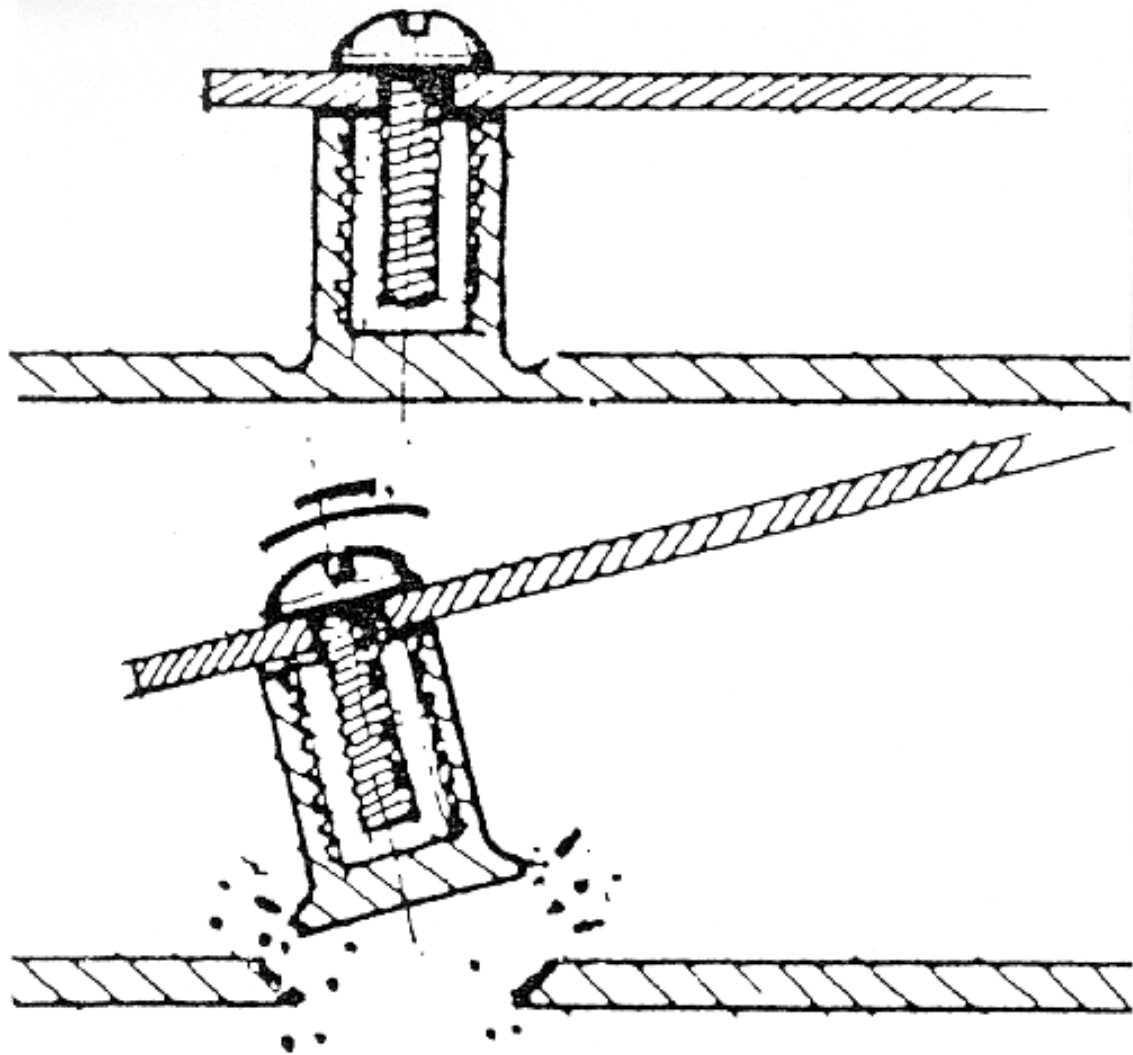
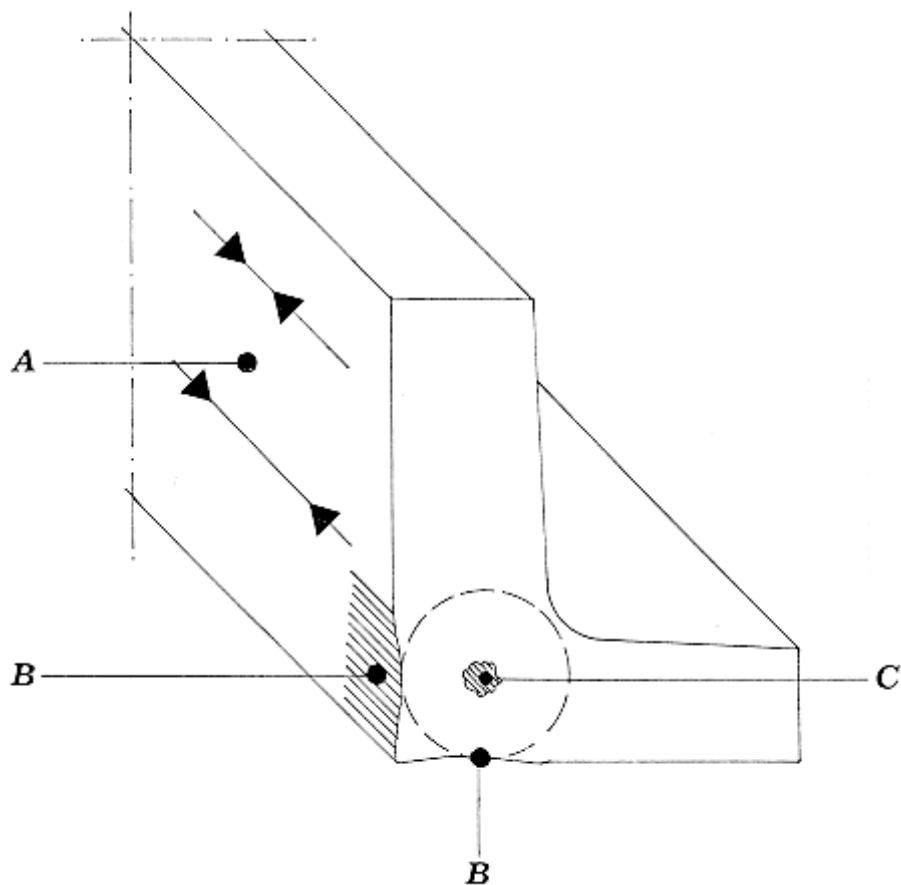
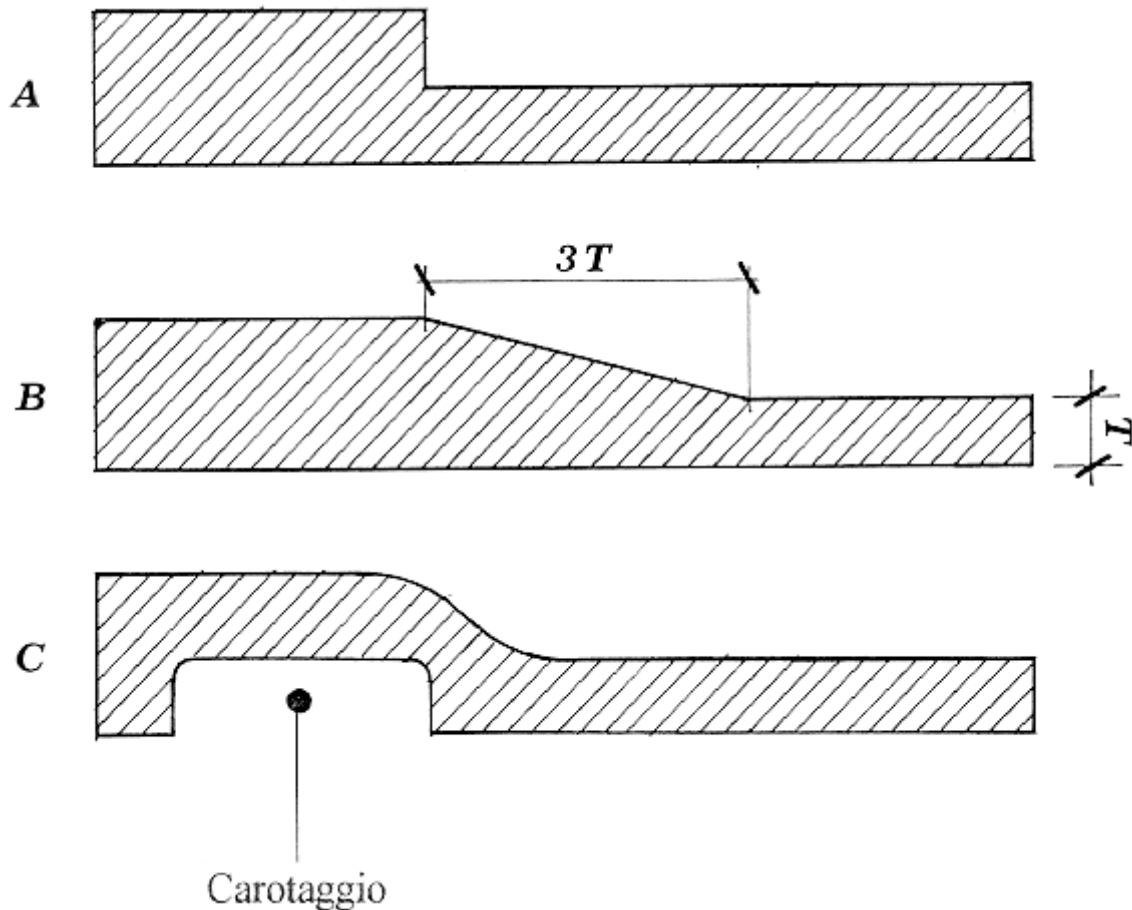
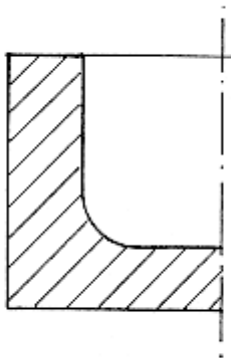
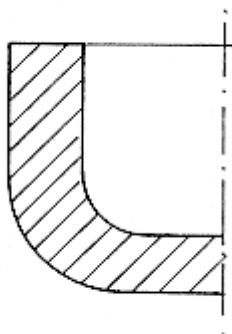
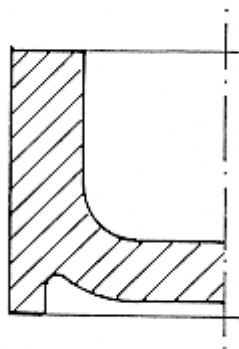
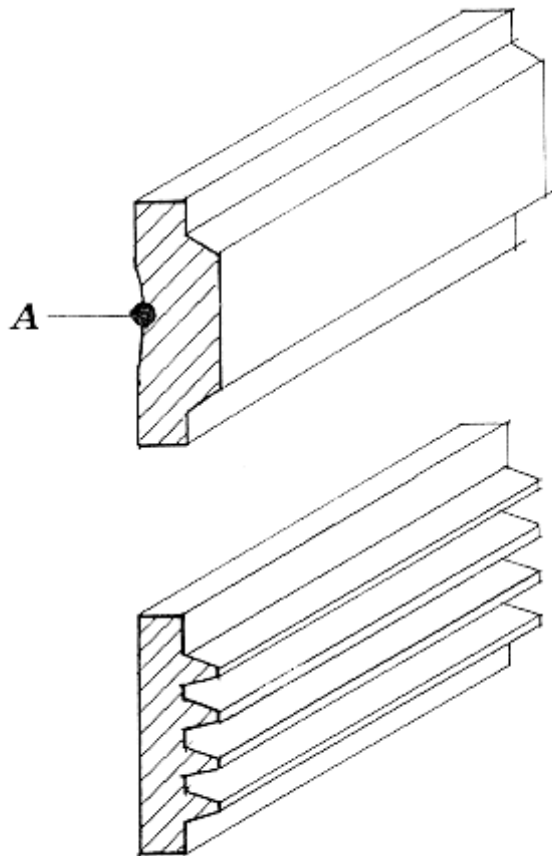
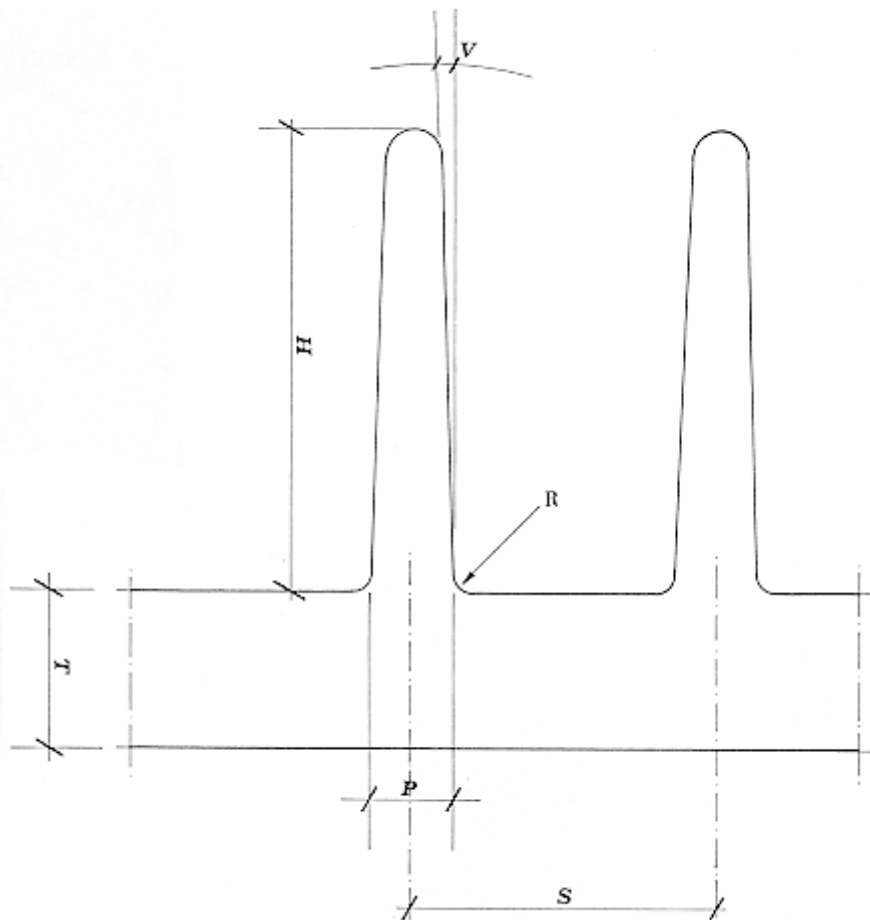
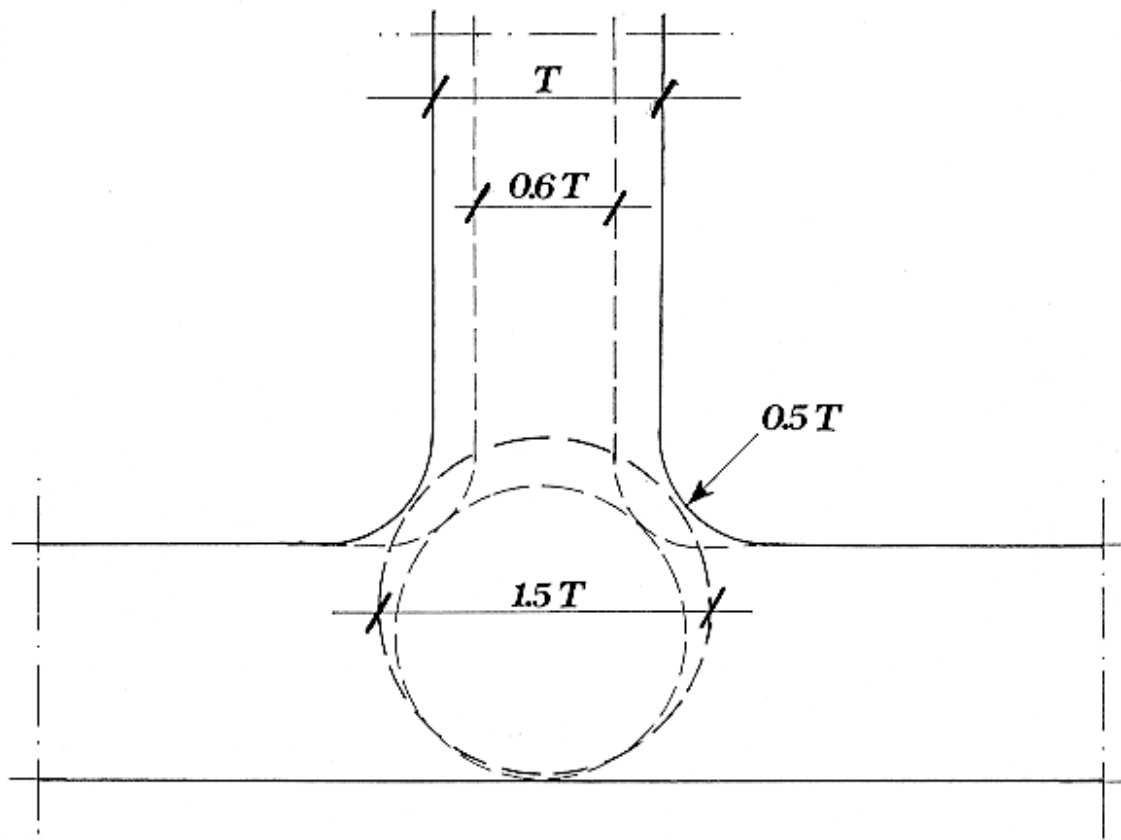
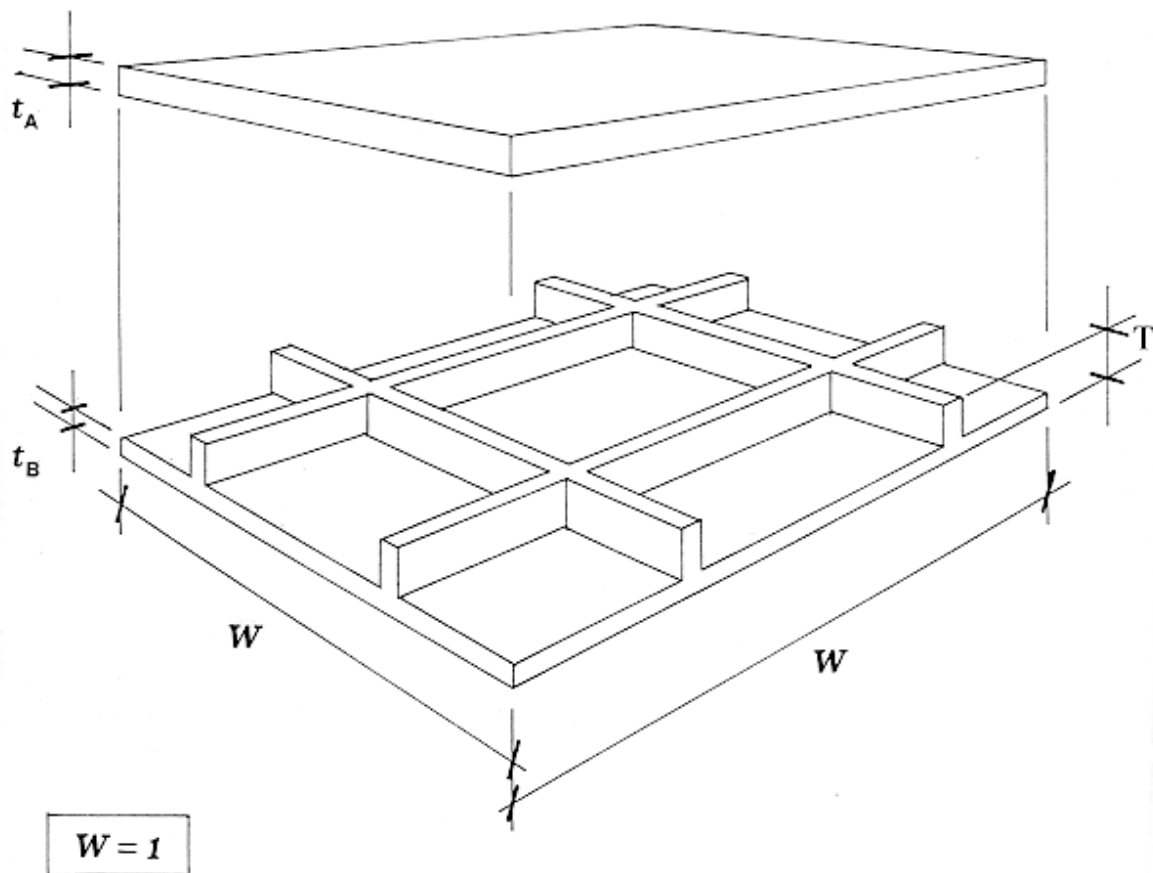
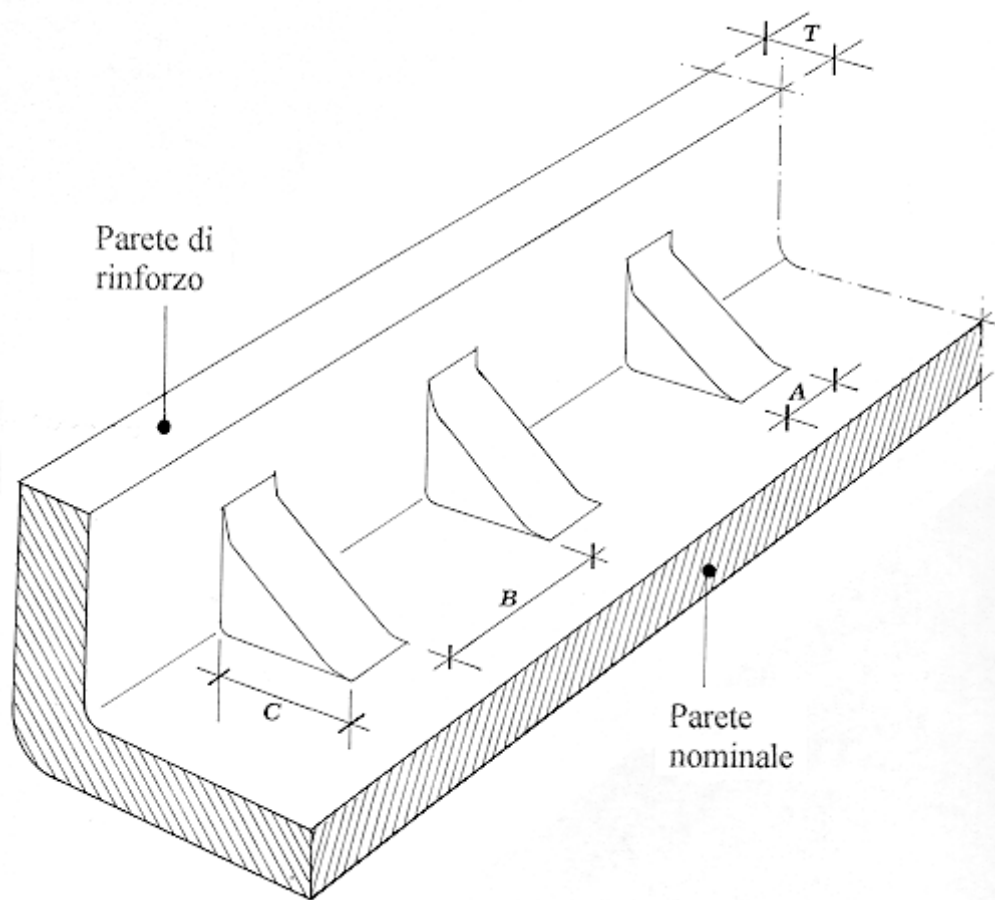



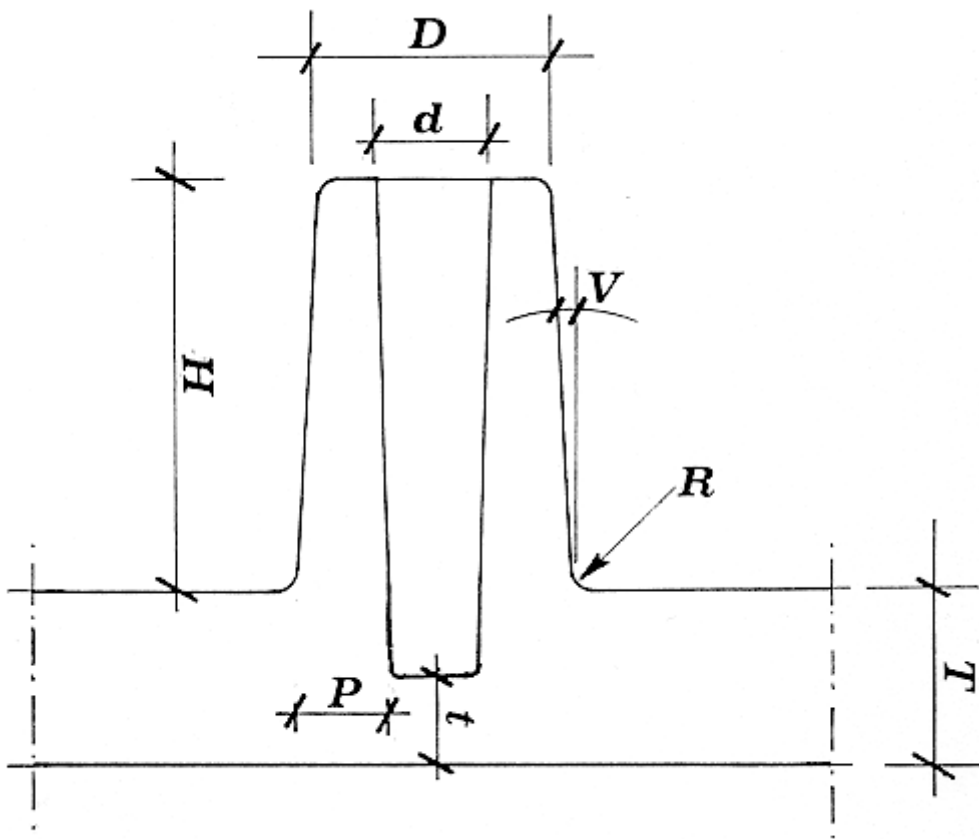
Fig. 93 Meccanismo di rottura per disassemblaggio componenti
La figura mostra un possibile meccanismo di rottura teso a garantire il disassemblaggio di componenti in materia plastica: per mezzo delle due tacche poste ai lati della borchia, tramite una leva, si può facilmente staccare la parete del componente (Fiocca, 1993).

Tav. 1 Effetti dello spessore di parete nominale non uniforme
La tavola evidenzia gli effetti provocati dalla variazione di spessore della parete nominale del componente stampato in materia plastica; in particolare, sono indicati il ritiro differenziato (A), i segni di risucchio (B) e i vuoti (C) (ridisegno dell'autore da originale Dupont, 1990, p. 3.2).

Tav. 2 Variazioni di spessore di parete nominale
La tavola evidenzia tre possibili modi per progettare le variazioni di spessore nella parete nominale del componente stampato in materia plastica: la sezione a spigolo vivo (A) è sconsigliata perchè causa fenomeni di concentrazione delle tensioni; la sezione rastremata (B) è consigliata con rapporti tra rastremazione e spessore di parete nominale di 3:1; la sezione carotata (C) è la migliore in quanto consente di mantenere uniforme lo spessore di parete nominale del componente (ridisegno dell'autore da originale Dupont, 1990, p. 3.3).

Tav. 3 Pareti d'angolo
La tavola evidenzia tre possibili soluzioni per progettare le pareti d'angolo di un componente stampato in materia plastica: la sezione a spigolo vivo (A) è sconsigliata perchè causa fenomeni di concentrazione delle tensioni e ritiro differenziato; la sezione raccordata (B) è consigliata; la sezione con carotaggio (C) è la migliore in quanto garantisce una adeguata rigidezza, mantenendo uniforme lo spessore di parete nominale del componente (ridisegno dell'autore da originale Dupont, 1990, p. 3.2).

Tav. 4 Sezioni nervate e non nervate
La tavola evidenzia come nei componenti stampati in materia plastica le sezioni nervate siano più indicate di quelle non nervate, in quanto evitano la formazione di deformazioni (A) derivanti da raffreddamenti differenziati della massa polimerica fusa (ridisegno dell'autore da originale Beck, 1980, p. 108).

Tav. 5 Dimensioni nervature
La tavola evidenzia le dimensioni per una corretta progettazione di sezioni nervate di componenti stampati in materia plastica. Esse sono:

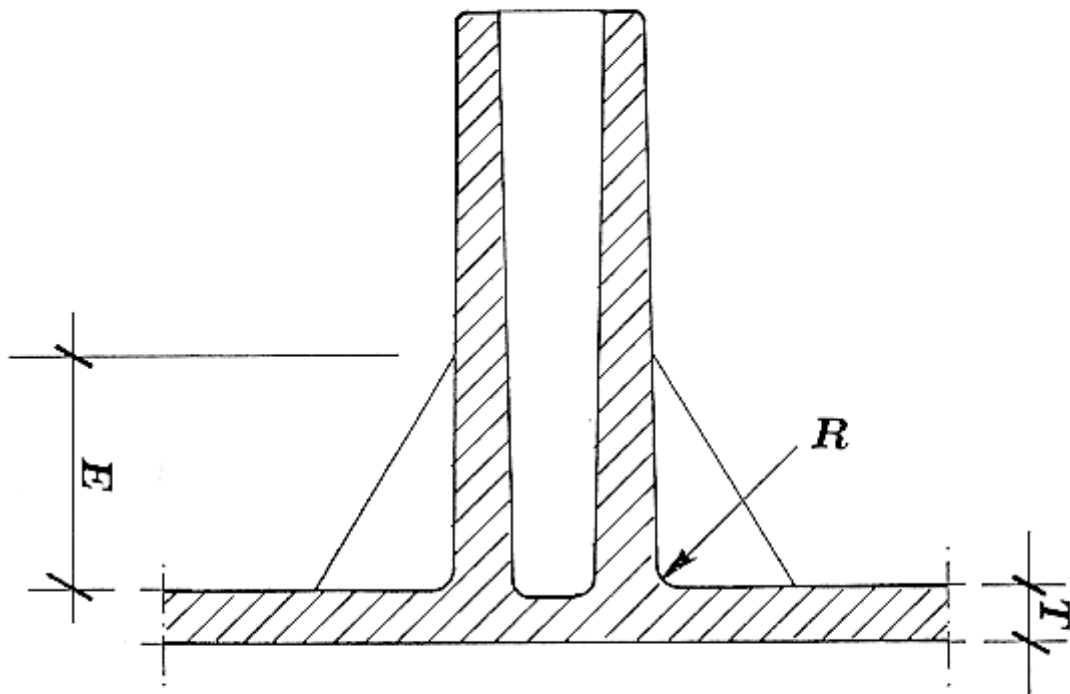
- spessore alla base
  P £ 0.4 T se T > 3 mm
  P £ 0.6 T se T < 3 mm;
- altezza nervatura
  H £ 3 T;
- raggio di raccordo
  R ^{3} 0.25 T - 0.4 T;
- angolo di sformatura
  V ^{3} 0.5°;
- passo nervature
  S ^{3} 2 T;

(ridisegno dell'autore da originale GE Plastics, 1994, p. 47).

Tav. 6 Spessore nervature
La tavola evidenzia come in un componente stampato in materia plastica una nervatura di spessore T uguale allo spessore della parete nominale, raccordata da un raggio pari a 0.5 T, produce un cerchio interno di diametro 1.5 T, dunque maggiore del 50 % rispetto allo spessore della parete nominale: ciò può causare vuoti nell'intersezione tra parete nominale e nervatura. Se, invece, la nervatura ha uno spessore contenuto nel 60 % di quello della parete nominale, si ottiene un cerchio inscritto di diametro T: in tal modo si evitano elevate concentrazioni degli sforzi e la formazione di vuoti (ridisegno dell'autore da originale Dupont, 1990, p. 3.2).

Tav. 7 Nervature bi-direzionali
La tavola evidenzia due sezioni stampate in materia plastica di rigidezza equivalente per le quali valgono le relazioni espresse nel diagramma di figura 84, dove:
t_A (mm) è lo spessore della parete nominale della piastra non nervata;
t_B (mm) è lo spessore della parete nominale della piastra nervata;
W (mm) è la larghezza della piastra, assunta uguale a 1;
T (mm) è lo spessore totale della piastra nervata;
(ridisegno dell'autore da originale Dupont, 1990, p. 4.22).

Tav. 8 Nervature di supporto
La tavola evidenzia le dimensioni per una corretta progettazione di sezioni con nervature di supporto di componenti stampati in materia plastica. Esse sono:

- spessore nervatura
  $0.7\ T\ ^{3}\ A\ ^{3}\ 0.5\ T$;
- distanza nervature
  $B\ ^{3}\ 2\ T$;
- lunghezza nervatura
  $C\ ^{3}\ 2\ T$;

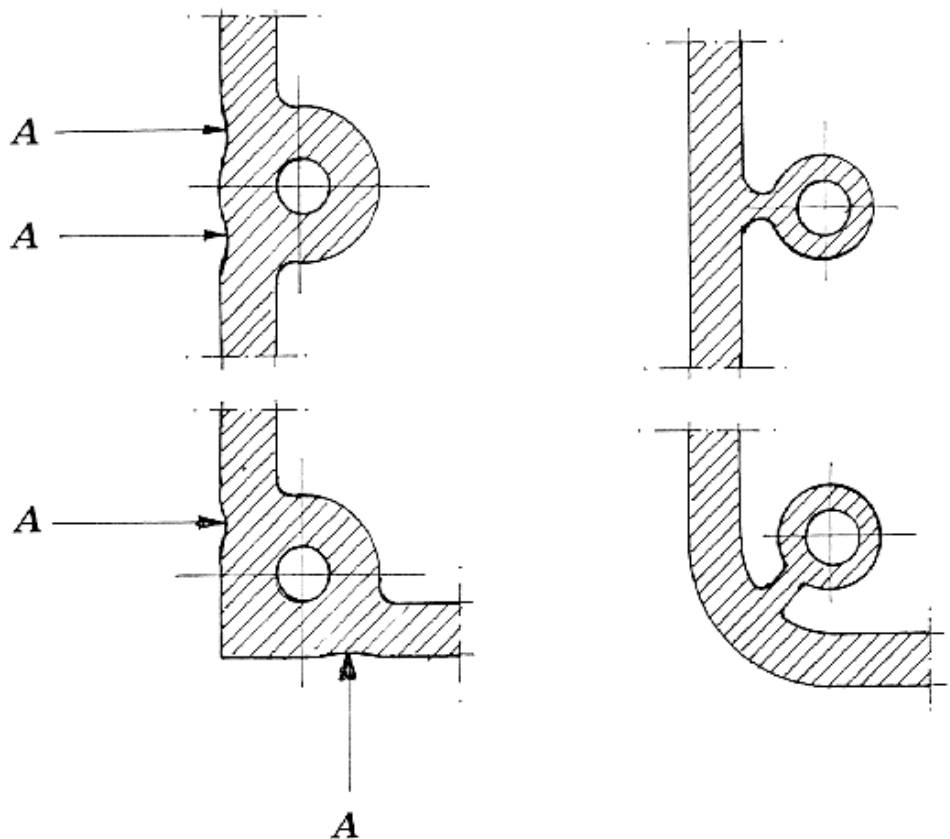
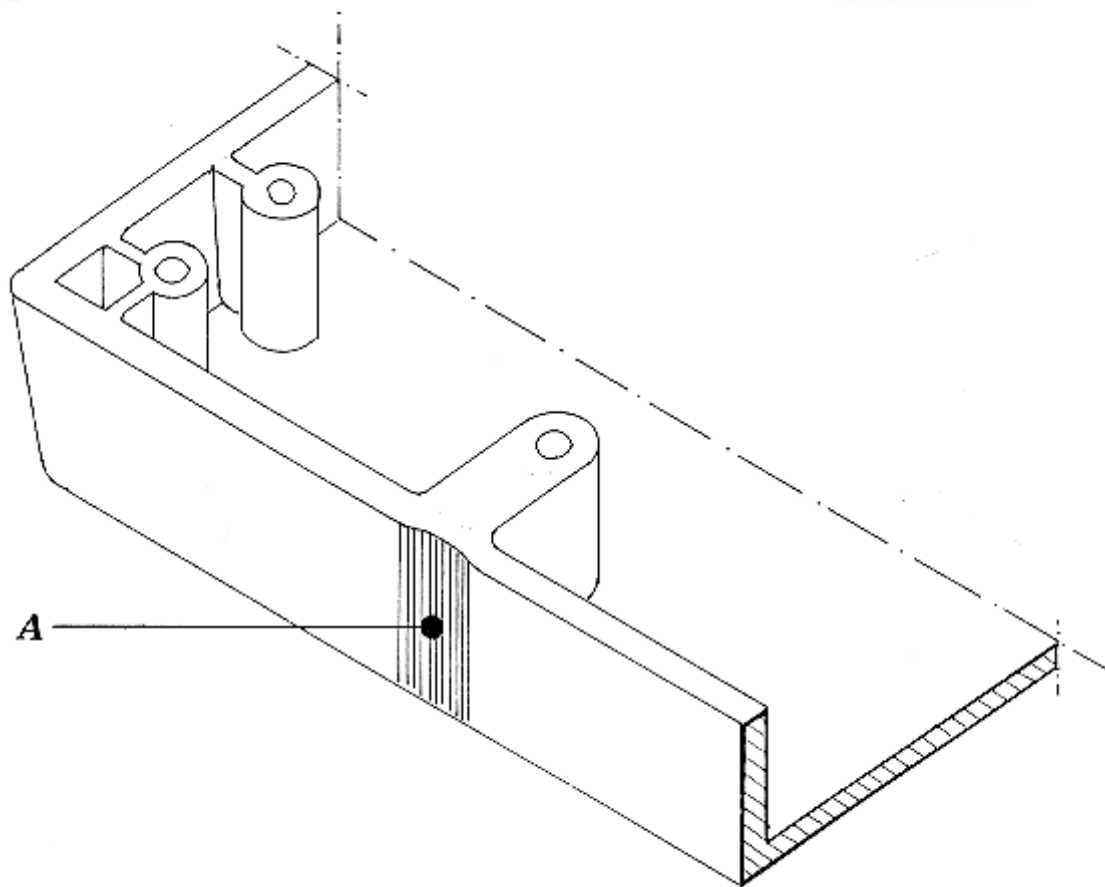
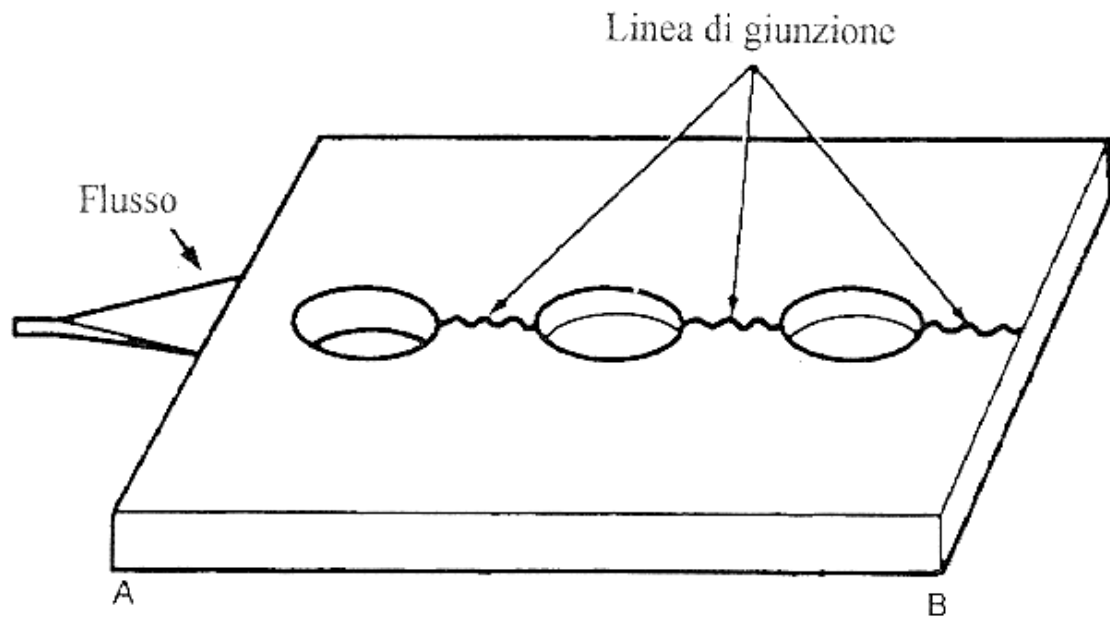
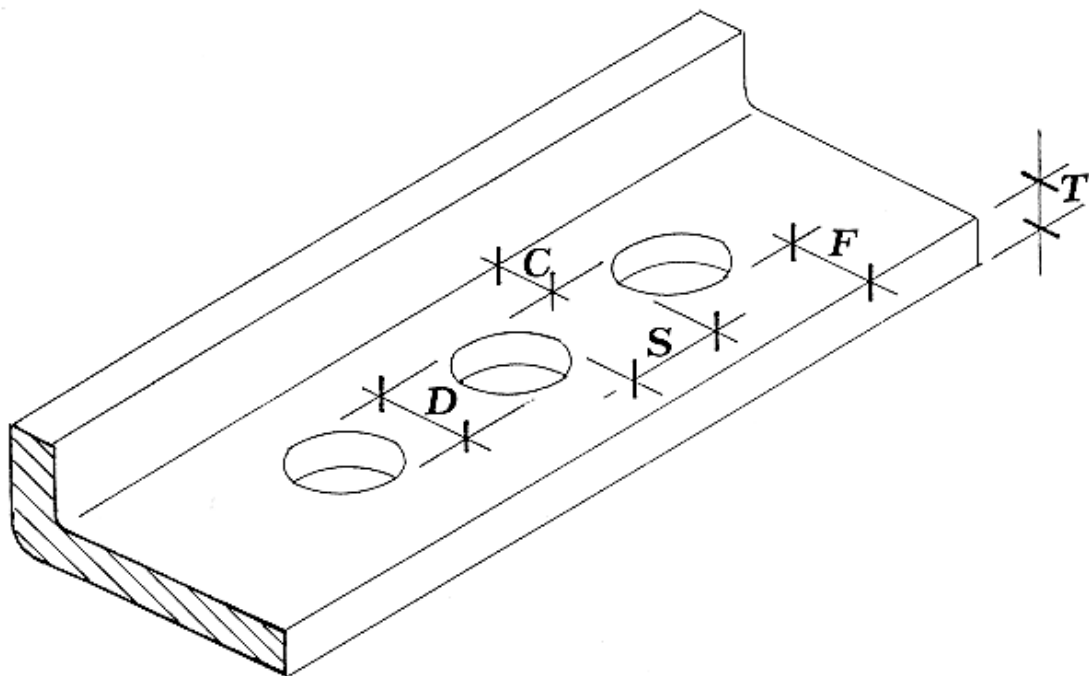
(ridisegno dell'autore da originale GE Plastics, 1994, p. 47).

Tav. 9 Dimensioni borchie
La tavola evidenzia le dimensioni per una corretta progettazione di sezioni con borchie di componenti stampati in materia plastica. Esse sono:

- spessore alla base
  P £ 0.6 T;
- spessore fondello
  0.5 T £ t £ 0.75 T;
- altezza borchia
  H £ 2.5 T;
- diametro esterno
  D @ 2 d;
- raggio di raccordo
  R ^{3} 0.25 T - 0.4 T;
- angolo di sformatura
  V ^{3} 0.5°;

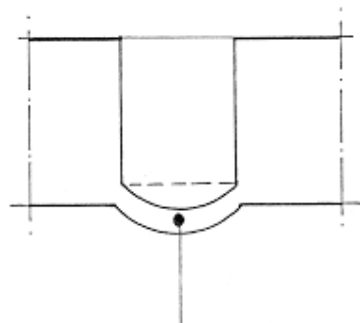
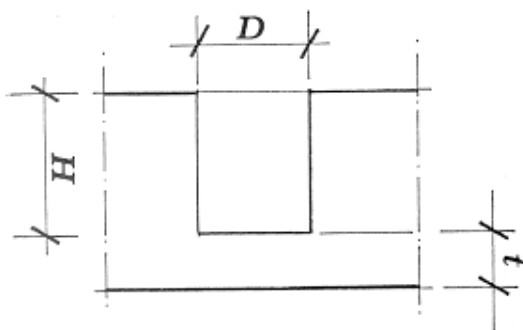
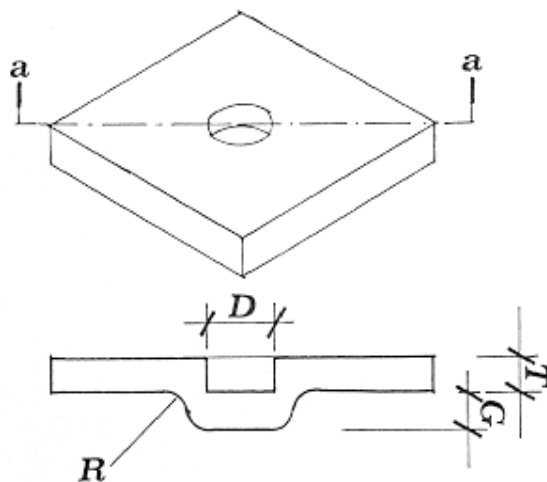
(ridisegno dell'autore da originale GE Plastics, 1994, p. 49).

Tav. 10 Borchie nervate

La tavola evidenzia le dimensioni per una corretta progettazione di sezioni con borchie nervate di componenti stampati in materia plastica. Esse sono:

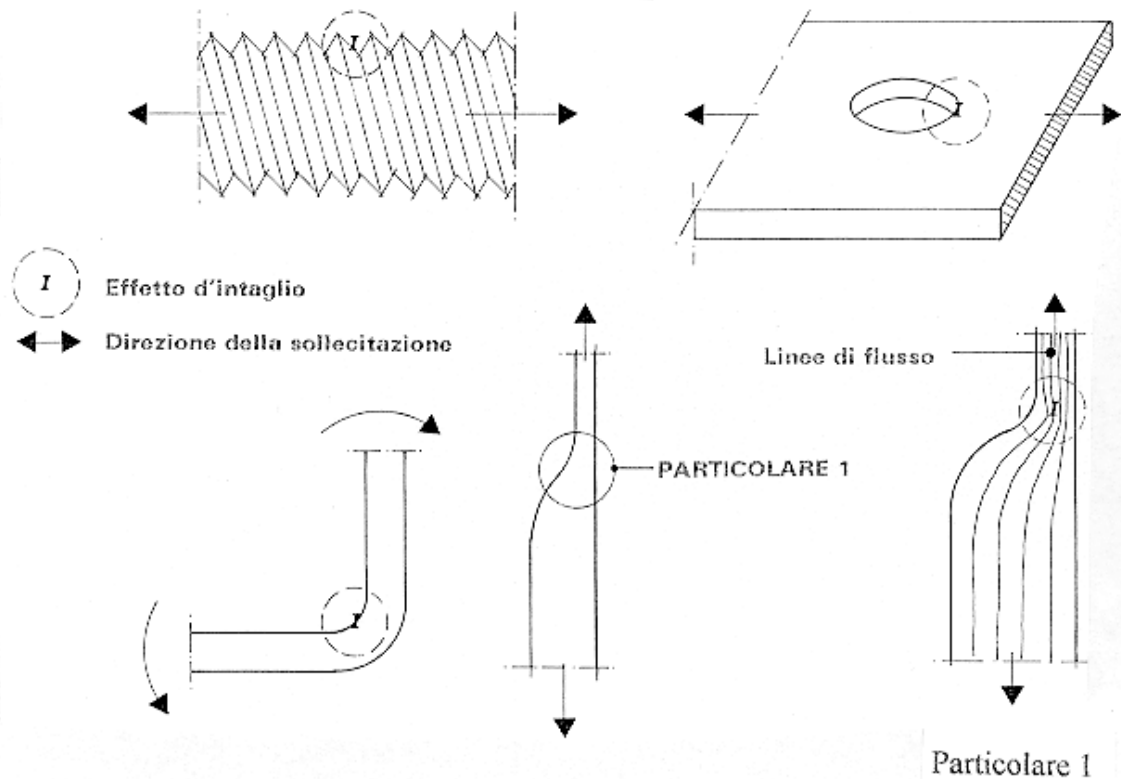
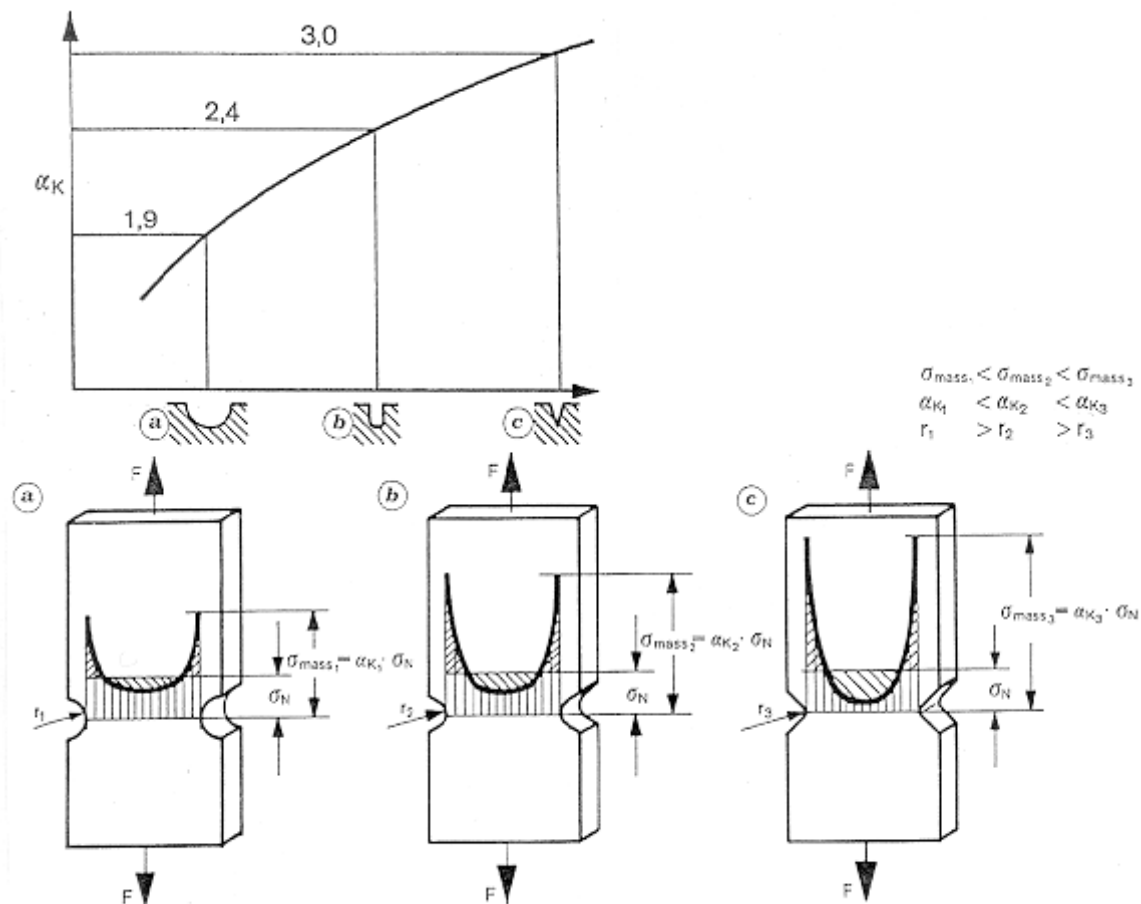
- altezza nervatura
  E^{3} 4 T;
- raggio di raccordo
  R^{3} 0.25 T - 0.4 T;

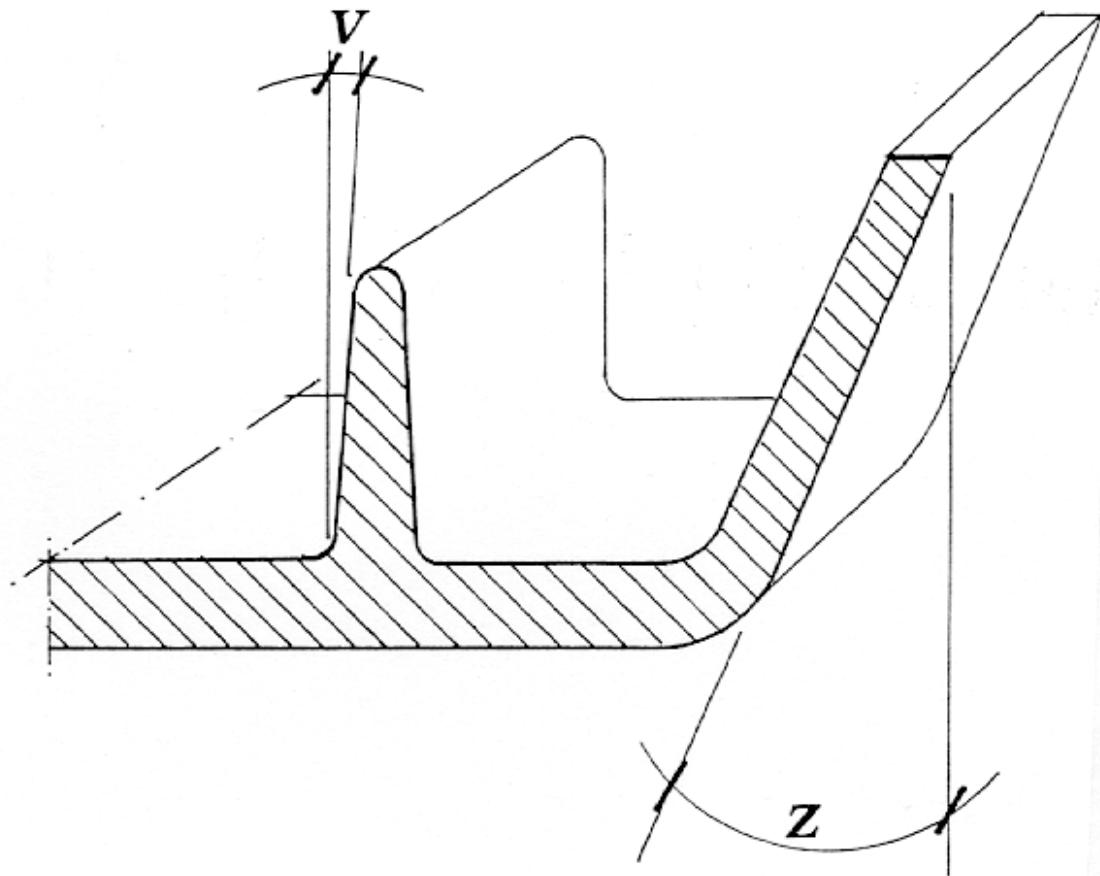
(GE Plastics, 1994, p. 49).

Tav. 11 Collegamento borchie/parete
La tavola evidenzia come nella progettazione di borchie su componenti stampati in materia plastica siano da evitare collegamenti alla parete nominale di spessore eccessivo, in quanto danno luogo a fenomeni di ritiro (A), mentro sono preferibili collegamenti di spessore uniforme, che aiutano lo sfogo dell'aria durante la fase di riempimento dello stampo (ridisegno dell'autore da originale Dupont, 1990, p 3.4).

Tav. 12 Collegamento borchie/parete
La tavola evidenzia come, nel collegamento di una borchia alla parete nominale di un componente stampato in materia plastica, siano preferibili nervature di spessore uniforme, per evitare fastidiosi segni di risucchio (A) (ridisegno dell'autore da originale GE Plastics, 1994, p. 49).

Tav. 13 Linee di giunzione
La tavola evidenzia la formazione della cosiddetta "linea di giunzione" nella zona dove il fuso polimerico si ricongiunge dopo avere superato l'anima inserita nello stampo per realizzare un foro o una cavità (ridisegno dell'autore da originale Dupont, 1990, p. 3.5).

Tav. 14 Dimensione fori
La tavola evidenzia le dimensioni per una corretta progettazione di sezioni forate di componenti stampati in materia plastica. Esse sono:

- distanza fori
  S ^{3} 2 T ^{3} D;
- distanza da bordo esterno
  F ^{3} 2 T ^{3} D;
- distanza da bordo interno
  C ^{3} 0.7 D;

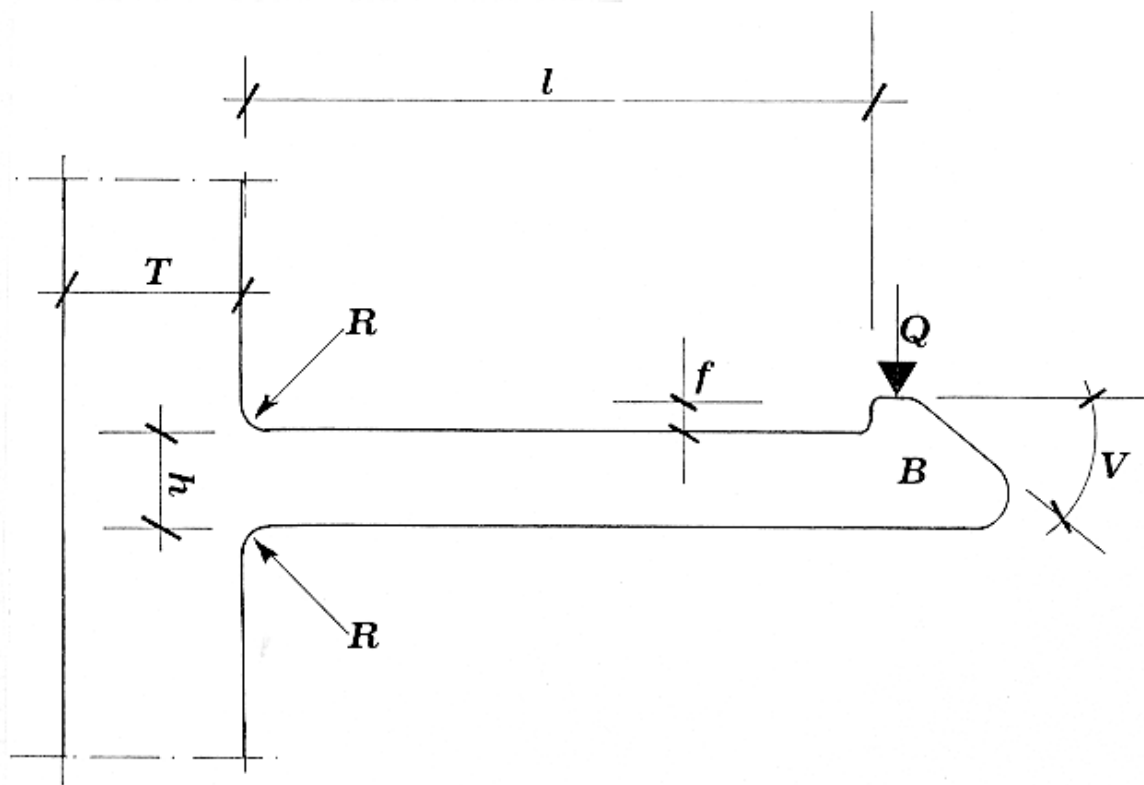
(ridisegno dell'autore da originale Dupont, 1990, p. 3.5).

Tav. 15 Dimensioni cavità
La tavola evidenzia le dimensioni per una corretta progettazione di sezioni cave di componenti stampati in materia plastica. Esse sono:

- profondità cavità
  H > 3 D se D > 6 mm
  H < 2 D se D < 6 mm;
- spessore fondello
  t^{3} 1/6 D
  G^{3} T;
- raggio di raccordo
  R^{3} 0.25 T - 0.4 T;

(ridisegno dell'autore da originale Dupont, 1990, p. 3.5).

Tav. 16 Effetto d'intaglio
La tavola evidenzia gli effetti dovuti a brusche variazioni della sezione in un componente stampato in materia plastica, variazioni dovute a filettature, fori e cavità, spessore non uniforme, raccordi (copia fotostatica da originale Hoechst, 1979[1], pp. 7-8).

Tav. 17 Raggio d'intaglio

La tavola evidenzia l'influenza della forma dell'intaglio sul fattore di concentrazione delle tensioni (a_K) (ridisegno dell'autore da originale Hoechst, 1979[1], p. 17).

Tav. 18 Angolo di sformatura
La tavola evidenzia gli angoli di sformatura da utilizzare per una corretta progettazione di componenti stampati in materia plastica. Essi sono:

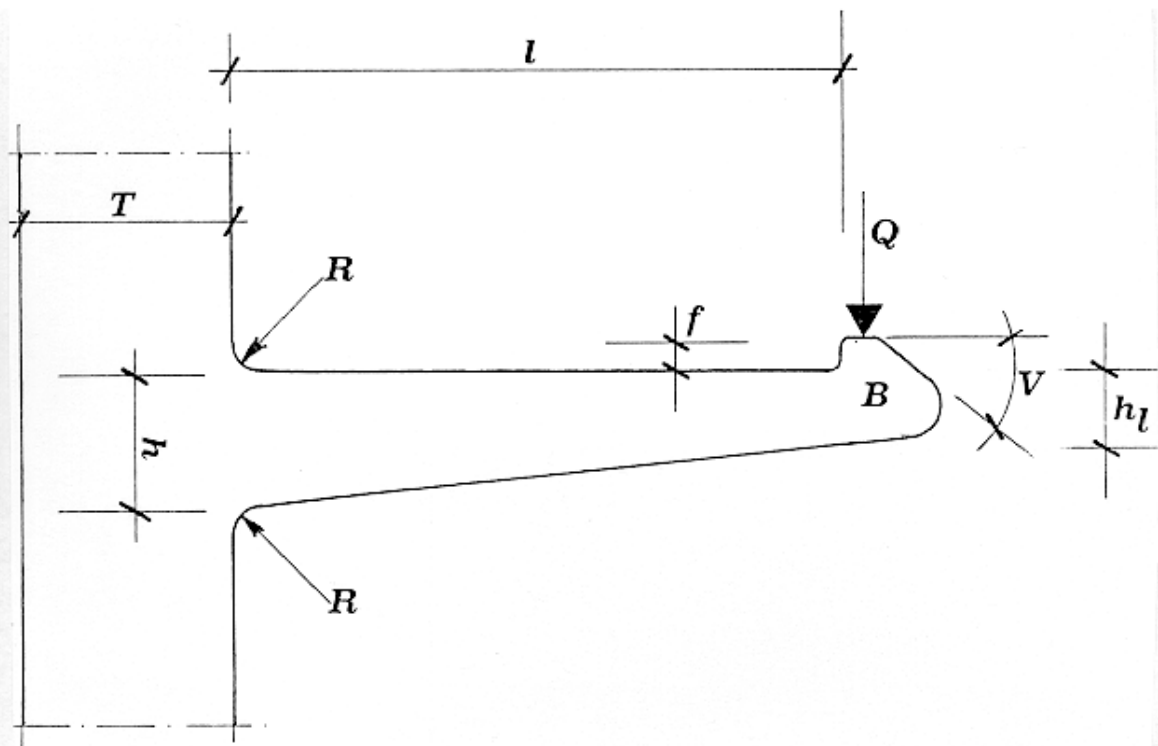
- angolo esterno
  V = 0.25° - 3°;
- angolo interno
  Z = fino 10°;

per superfici goffrate l'angolo di sformatura va aumentato di 0.4° ogni 0.01 mm di profondità della goffratura (ridisegno dell'autore da originale GE Plastics, 1994, p. 51).

Tav. 19 Giunto a incastro elastico a sezione costante
La tavola evidenzia le dimensioni corrette per la progettazione di un giunto a incastro elastico a sezione costante su un componente stampato in materia plastica. Esse sono:

- raggio di raccordo
  R^{3} 0.4 T;
- sezione d'attacco al componente
  h^{3} 0.6 T;
- angolo d'invito
  V = 30° - 45°;

per il calcolo della freccia, inoltre, vale la seguente relazione:

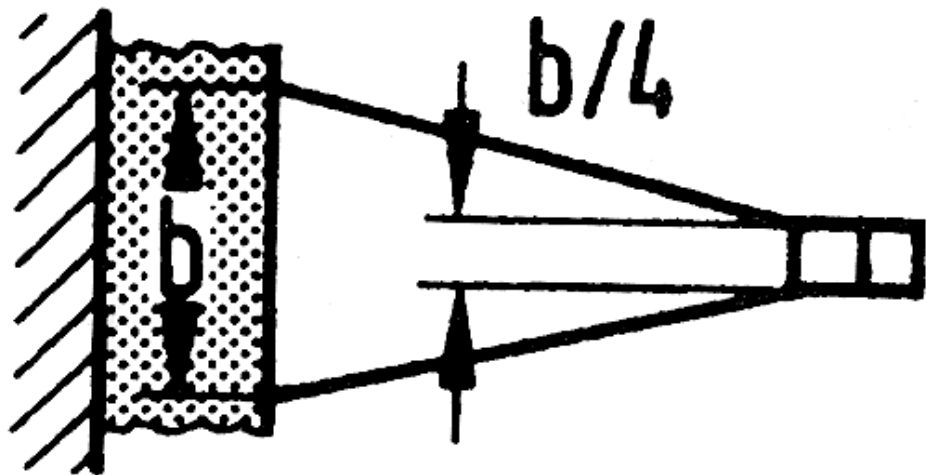
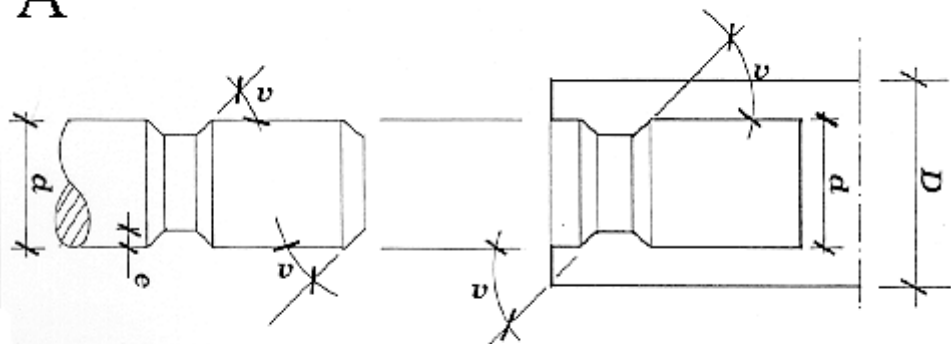
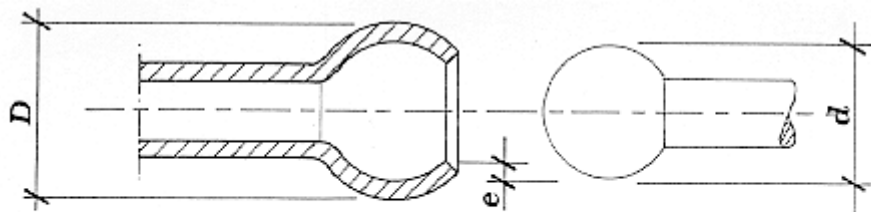
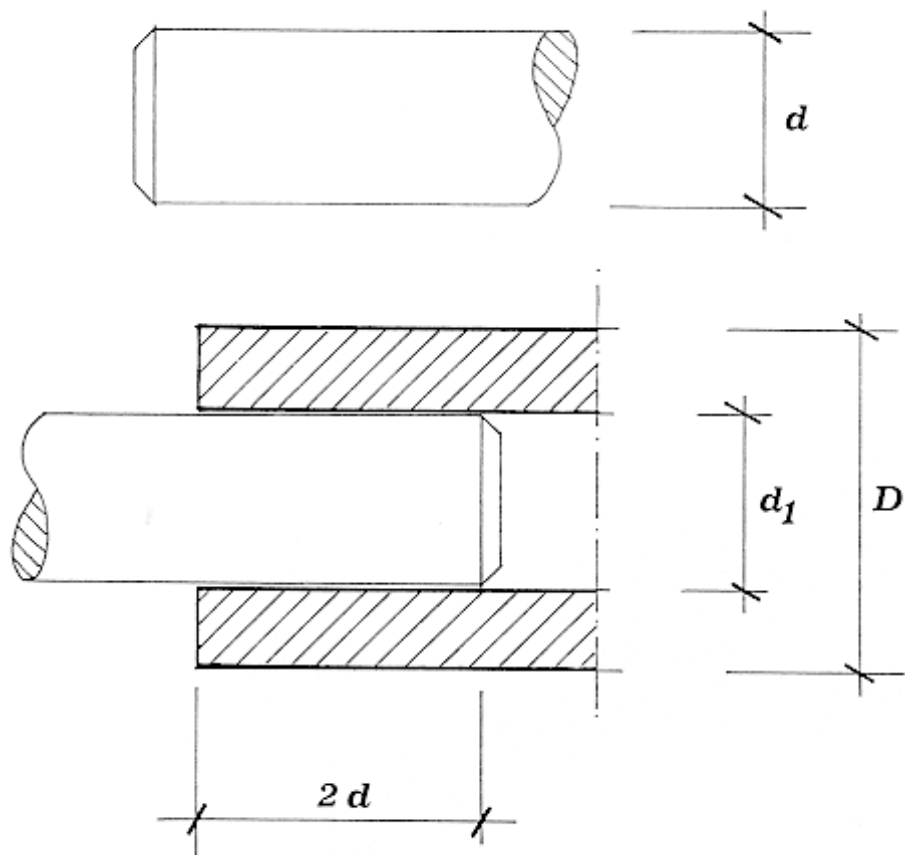
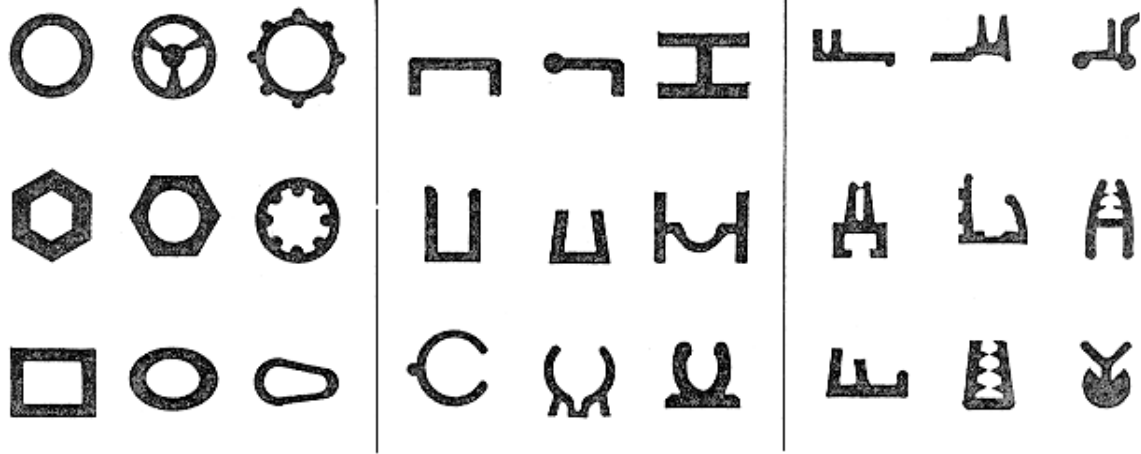
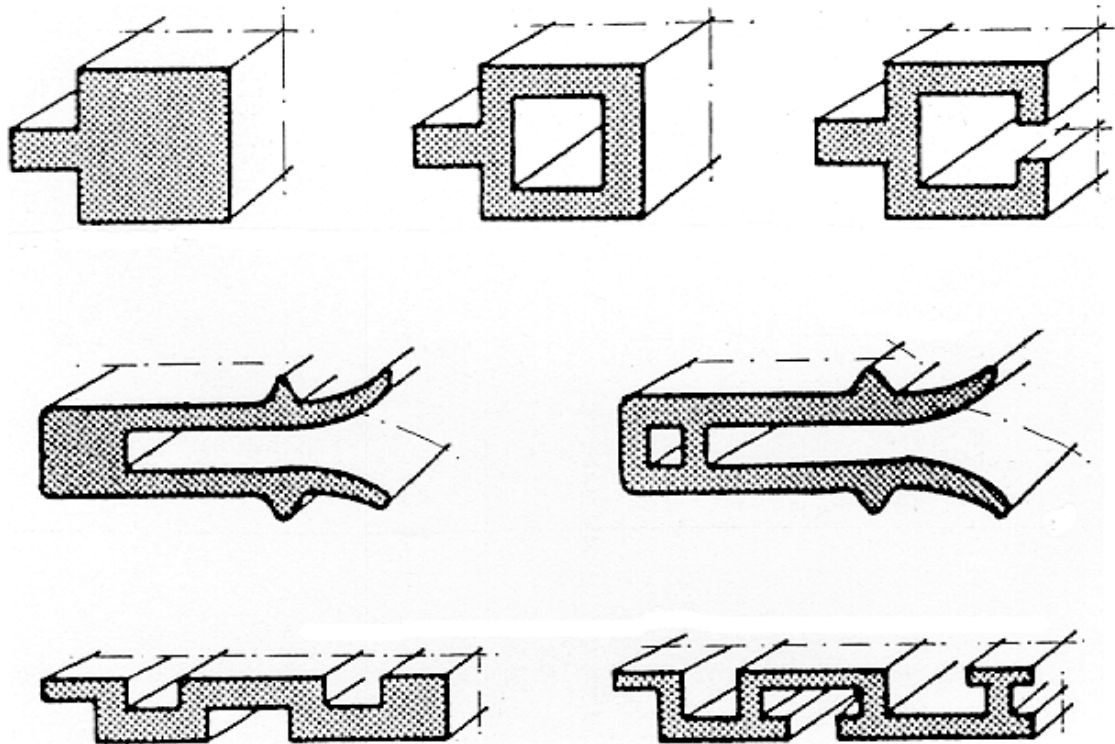
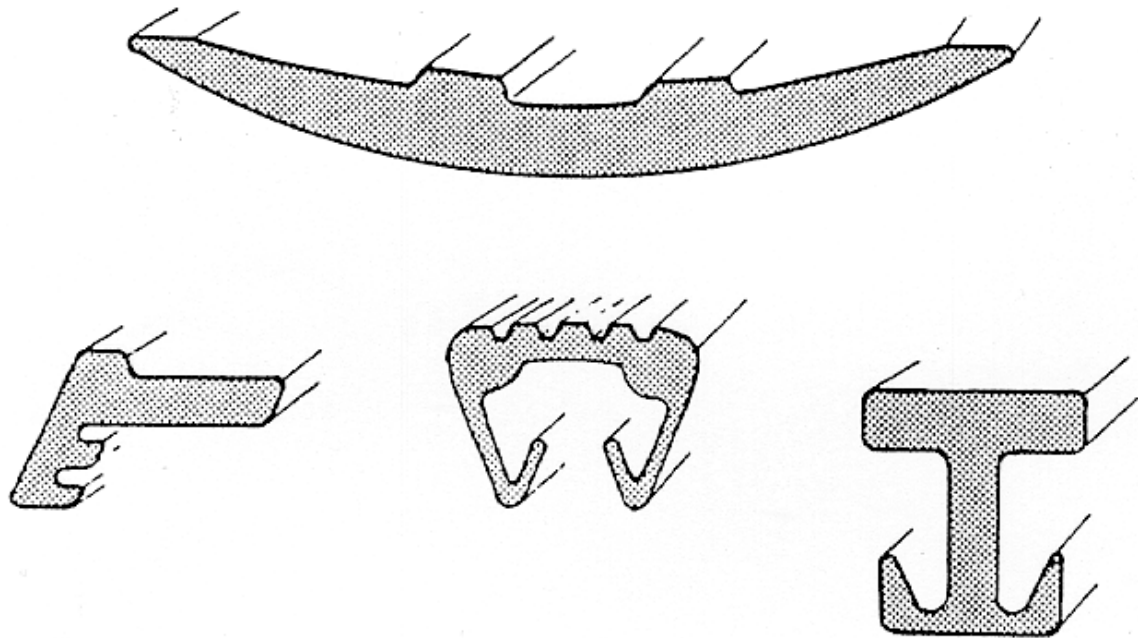
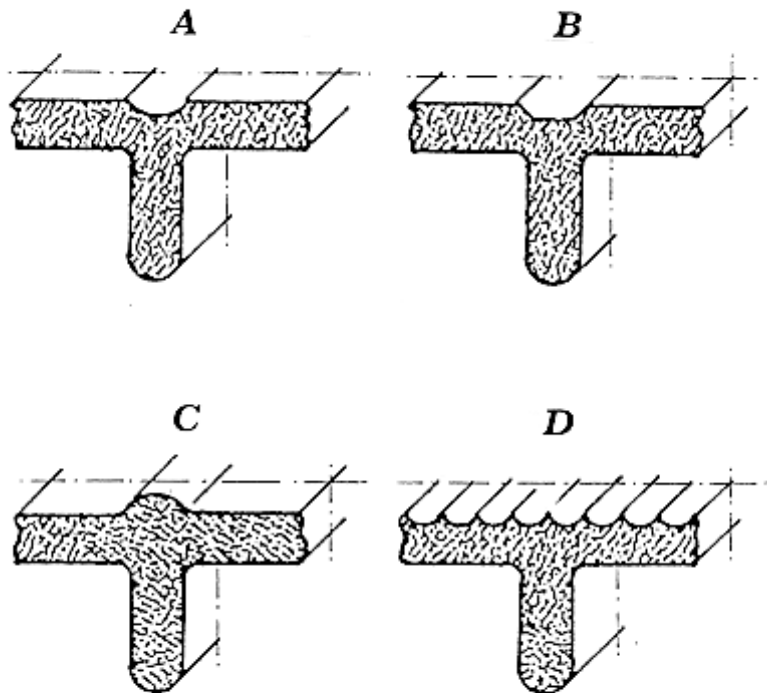
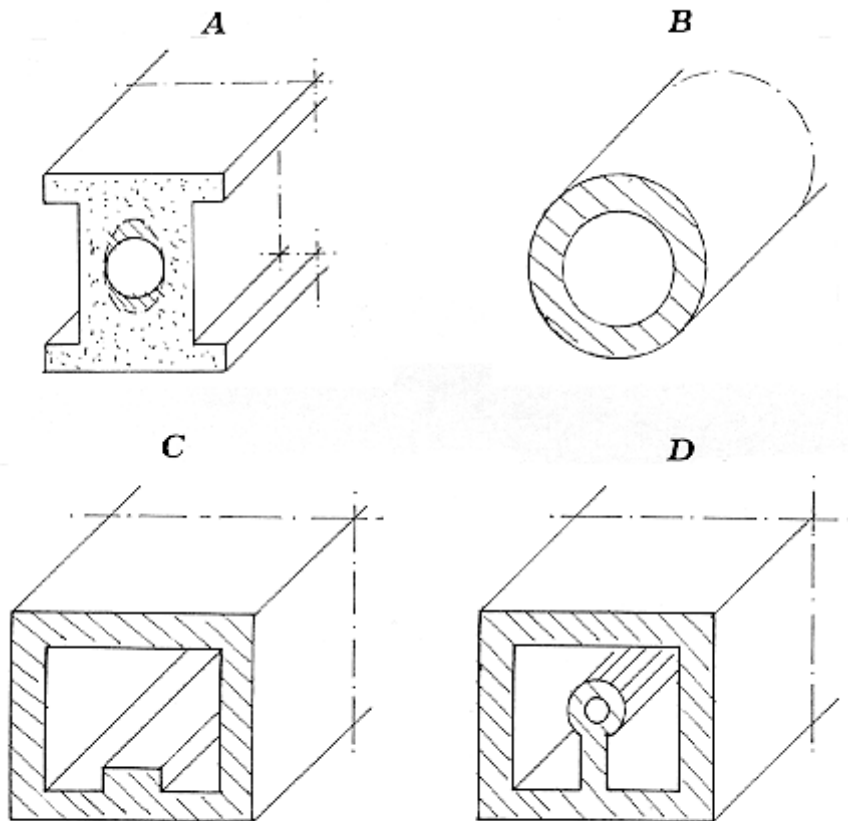
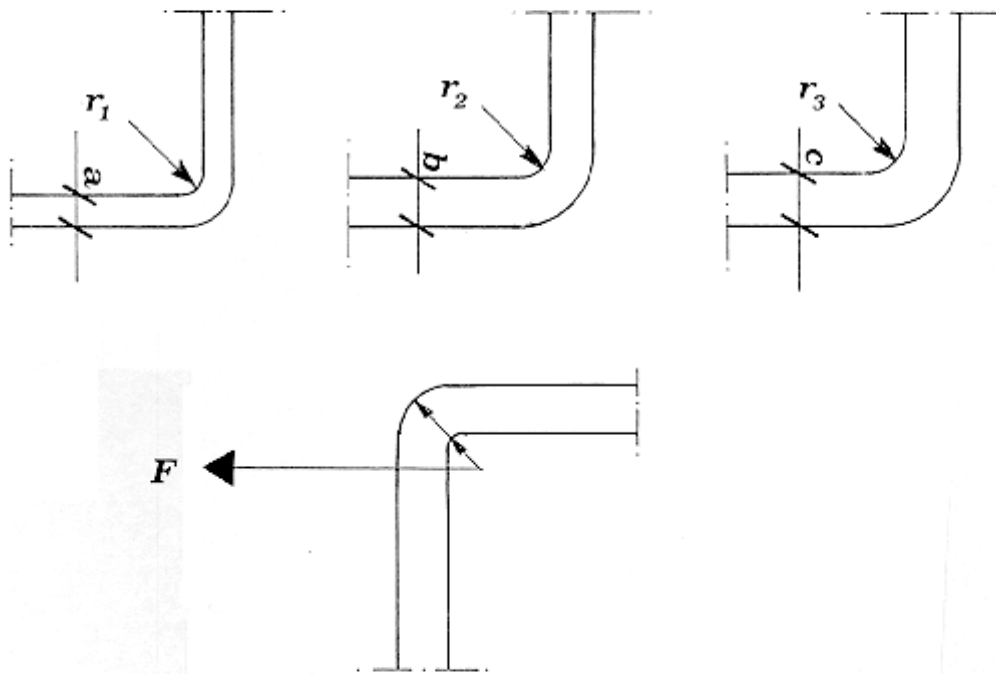
- f @ 0.03 (l^{2}/h) K £ 50 % l
  dove K è il coefficiente di proporzionalità (Fig. 91);

(ridisegno dell'autore da originale GE Plastics, 1994, p. 55).

Tav. 20 Giunto a incastro elastico a sezione rastremata
La tavola evidenzia le dimensioni corrette per la progettazione di un giunto a incastro elastico a sezione rastremata su un componente stampato in materia plastica. Esse sono:

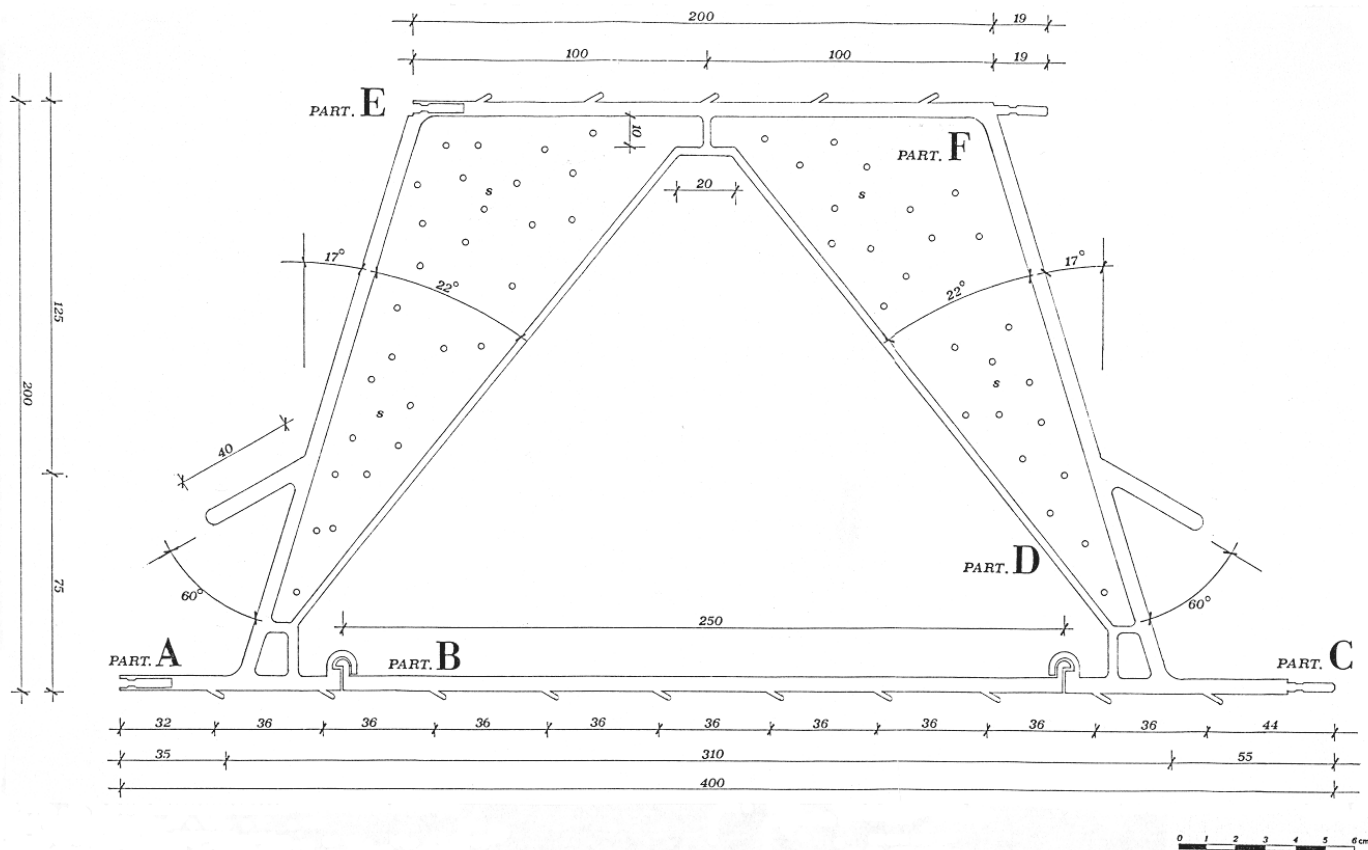
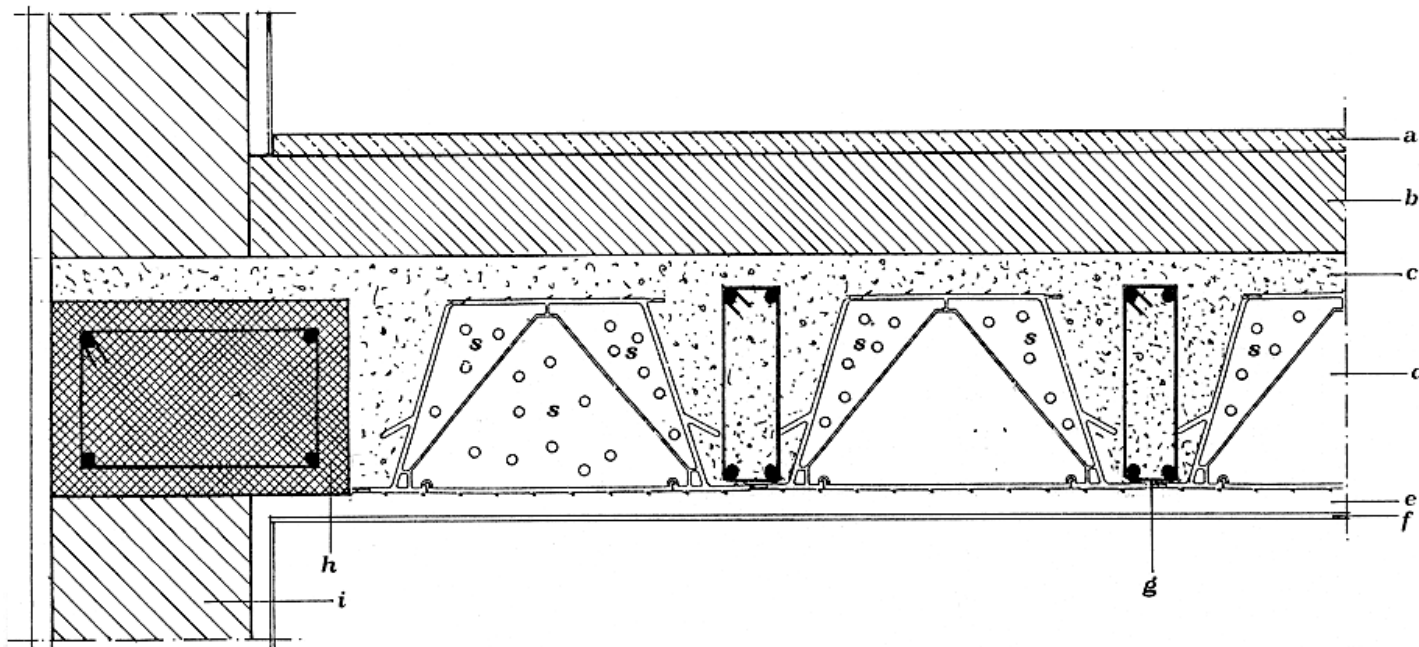
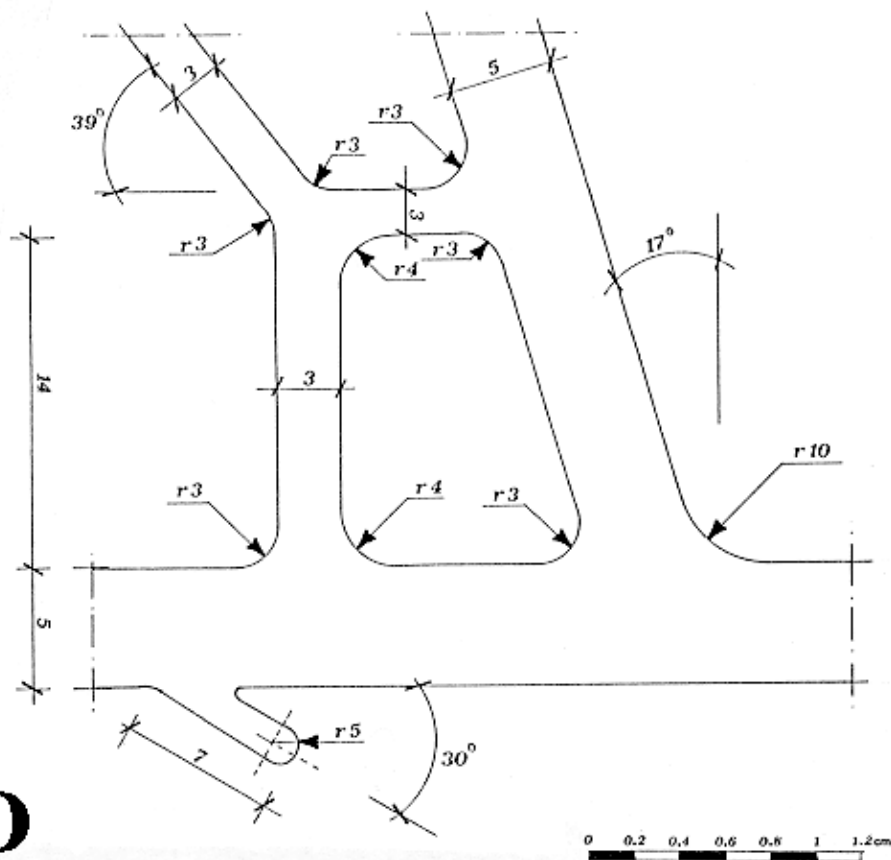
- raggio di raccordo
  R ^{3} 0.4 T;
- sezione d'attacco al componente
  h ^{3} 0.6 T;
- angolo d'invito
  V = 30° - 45°;
- altezza dell'estremità libera
  0.5 ^{3} h_l ^{3} 0.7 h;

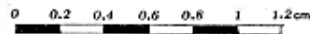
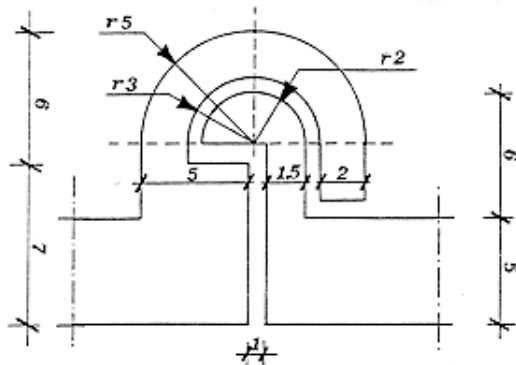
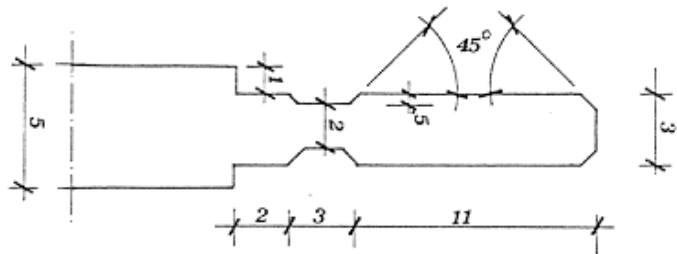
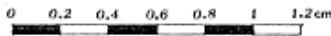
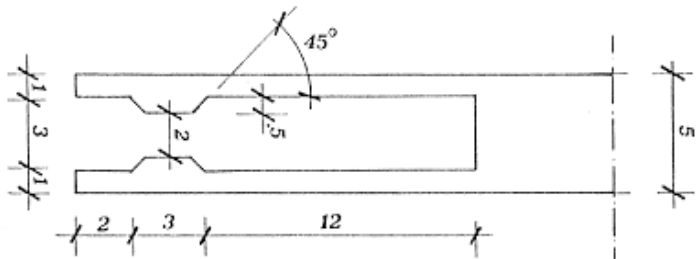
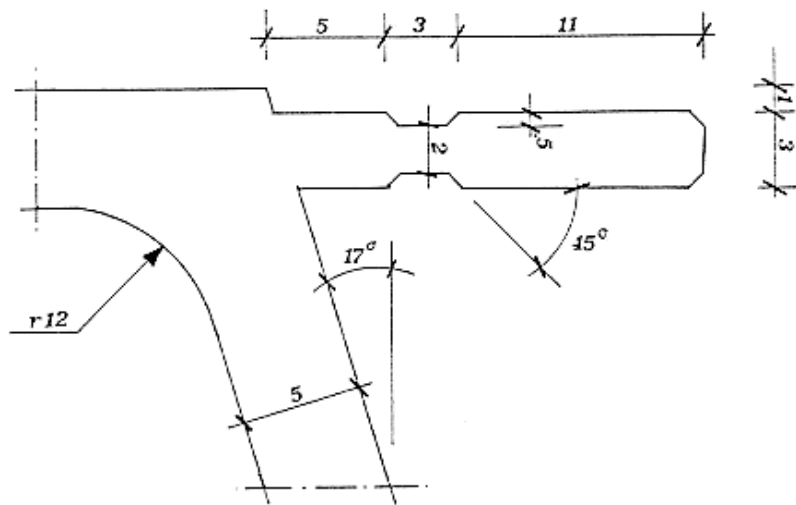
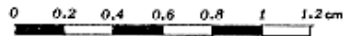
per il calcolo della freccia, inoltre, vale la seguente relazione:

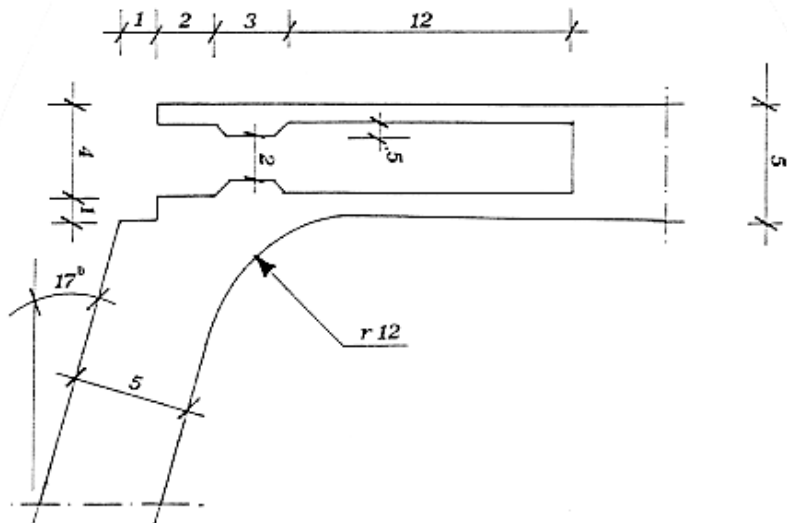
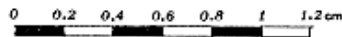
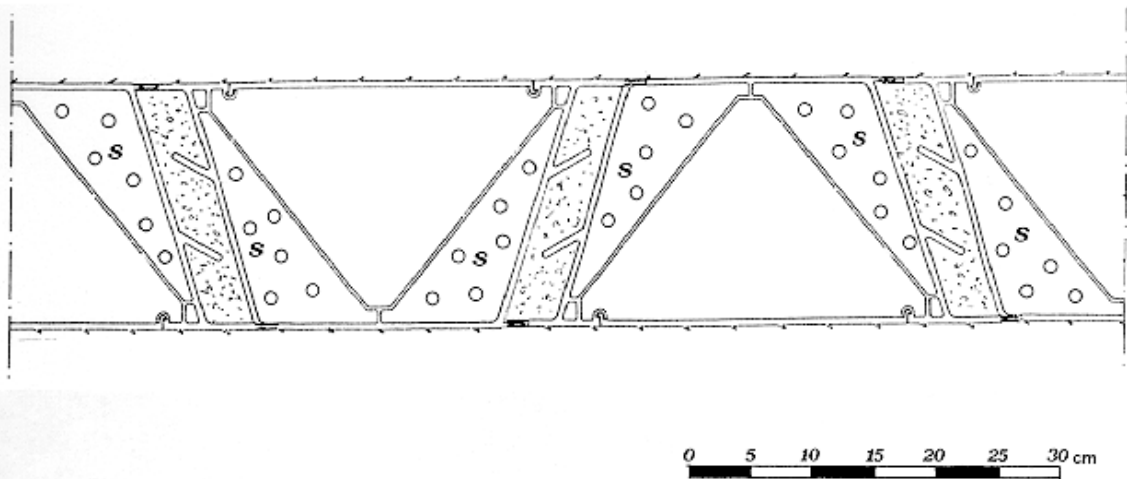
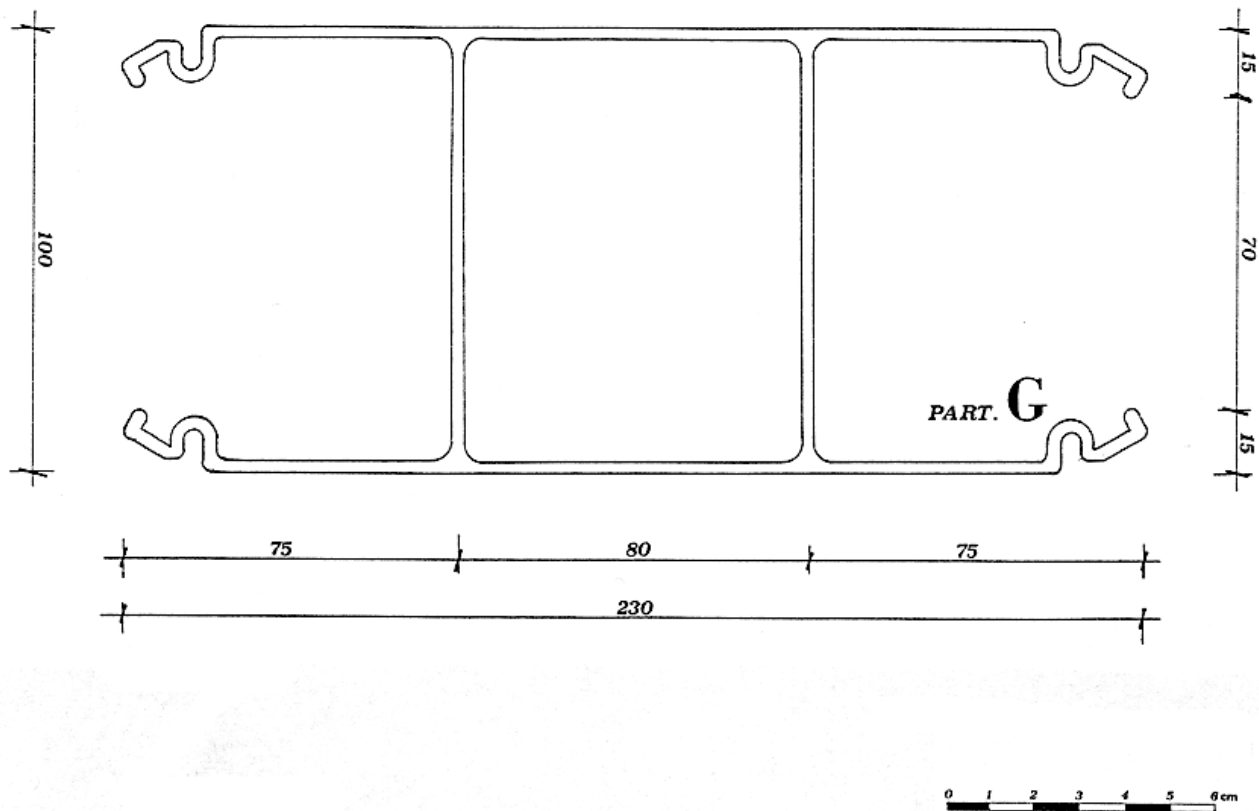
- f @ 0.03 (l^2/h) K £ 50 % l
  dove K è il coefficiente di proporzionalità (Fig. 91);

(ridisegno dell'autore da originale GE Plastics, 1994, p. 55).

Tav. 21 Giunto a incastro elastico a sezione trasversale variabile
La tavola evidenzia un esempio di giunto a incastro elastico a sezione trasversale variabile per componenti stampati in materia plastica (ridisegno dell'autore da originale Saechtling, 1994, p. 177).

Tav. 22 Giunto a incastro elastico a sezione cilindrica e sferica
La tavola evidenzia due esempi di giunti a incastro elastico, rispettivamente a sezione cilindrica (A) e sferica (B), per componenti stampati in materia plastica. Per i rapporti tra diametro dell'attacco (D), diametro dello spinotto (d) e interferenza diametrale vale quanto riportato nella Tab. 17. Sulla testa dell'inserto e all'interno dell'attacco è buona regola prevedere degli smussi d'invito (v) a 45° (ridisegno dell'autore da originale Dupont, 1990, p. 9.9).

Tav. 23 Giunto a pressione
La tavola evidenzia un esempio di giunto a pressione per componenti stampati in materia plastica, dove:
D (mm) è il diametro esterno dell'attacco del giunto;
d_1 (mm) è il diametro interno dell'attacco del giunto;
d (mm) è il diametro esterno dello spinotto;
$d-d_1$ (mm) è l'interferenza diametrale (I_D);
(ridisegno dell'autore da originale Dupont, 1990, p. 9.7).

Tav. 24 Esempi di profili estrusi
La tavola evidenzia alcuni tra i più comuni profili estrusi in materia plastica (copia fotostatica da originale Beck, 1980, p. 283).

Tav. 25 Uniformità di parete nei profili estrusi
La tavola evidenzia come, nel caso di profili estrusi in materia plastica, sia possibile mantenere lo spessore di parete uniforme attraverso l'inserimento di cavità e sottosquadri, al fine di evitare distorsioni dimensionali nel componente (ridisegno dell'autore da originale Beck, 1980, p. 289).

Tav. 26 Profili estrusi di spessore non uniforme
La tavola evidenzia alcuni esempi di profili estrusi in materia plastica dove, per garantire una adeguata elasticità del componente, è necessario ricorrere a uno spessore di parete non uniforme (ridisegno dell'autore da originale Beck, 1980, p. 289).

Tav. 27 Nervature e contronervature
La tavola evidenzia alcuni possibili accorgimenti tesi a evitare la formazione di segni di risucchio (A) sulla superficie opposta alla nervatura in un profilo estruso in materia plastica. Si possono prevedere delle riseghe (B), delle contronervature (C) oppure delle dentellature (D) (ridisegno dell'autore da originale Beck, 1980, p. 290).

Tav. 28 Vuoti e cavità
La tavola evidenzia alcuni accorgimenti che occorre considerare nella progettazione di vuoti e cavità su profili estrusi in materia plastica: è necessario evitare pareti non uniformi perchè generano forme non regolari (A), mentre, al contrario, spessori uniformi della parete aiutano a controllare la sezione (B); sono da evitare sporgenze interne di profondità superiore allo spessore della parete nominale del componente (C), così come le diramazioni interne, che risultano difficilmente controllabili in fase di raffreddamento (D) (ridisegno dell'autore da originale Beck, 1980, pp. 290-291).

Tav. 29 Spessore parete e raccordi
La tavola evidenzia i rapporti da considerare tra spessore di parete nominale del componente e raccordi, per la progettazione di profili estrusi in materia plastica. Essi sono:

- per 0.5 mm ^{3} a ^{3} 1 mm
  r_1 ^{3} 0.4 mm;
- per 1 mm ^{3} b ^{3} 2mm
  r_2 ^{3} 0.8 mm;
- per c ^{3} 2 mm
  r_3 ^{3} 1.5 mm;

inoltre, è opportuno che raccordo interno e raccordo esterno del profili abbiano lo stesso centro (F) (ridisegno dell'autore da originale Beck, 1980, p. 292).

Tav. 30 Elemento estruso in polivinilcloruro (PVC) rigido riciclato
La tavola evidenzia la sezione di un elemento estruso in polivinilcloruro (PVC) rigido riciclato, elemento utilizzabile in sostituzione delle pignatte in laterizio impiegate nei solai in latero-cemento. L'elemento, alto 200 mm e largo 400 mm, è suddiviso in tre parti di cui le due laterali sono riempite di resina espansa per garantire la resistenza a compressione, mentre quella centrale è disponibile per alloggiare eventuali impianti all'interno del solaio, grazie a un coperchio riposizionabile (riduzione fotostatica da originale su lucido dell'autore in scala 1:1).

Tav. 31 Esempio applicativo per solaio attrezzabile
La tavola evidenzia una applicazione dell'elemento estruso in plastica riciclata per realizzare un solaio attrezzabile dove, una volta posizionati gli impianti e richiuso il coperchio, il plafone viene intonacato: per questo motivo all'intradosso e all'estradosso dell'elemento sono previste delle alette per migliorare l'aderenza del rinzaffo, mentre le due ali laterali servono a evitare il distacco del pezzo dal calcestruzzo in opera. Qualora il plafone venga controsoffittato si realizzano solai ispezionabili.
Legenda: a) pavimento, b) sottofondo, c) cappa in calcestruzzo spessore 40 mm, d) elemento estruso in polivinilcloruro (PVC) rigido riciclato, e) intonaco, f)rasatura, g) ferri di armatura in acciaio Fe 360, h) trave di bordo in calcestruzzo armato, i) setto portante, s) resina espansa tipo "Caril" della GE Plastics;
(riduzione fotostatica da originale su lucido dell'autore in scala 1:5).

Tav. 32 Particolare dell'angolo (D)
La tavola evidenzia il particolare dell'angolo tra la parete inclinata e l'intradosso dell'elemento estruso in plastica riciclata, con il raccordo della parete inclinata interna (Part. D) (riduzione fotostatica da originale su lucido dell'autore in scala 5:1).

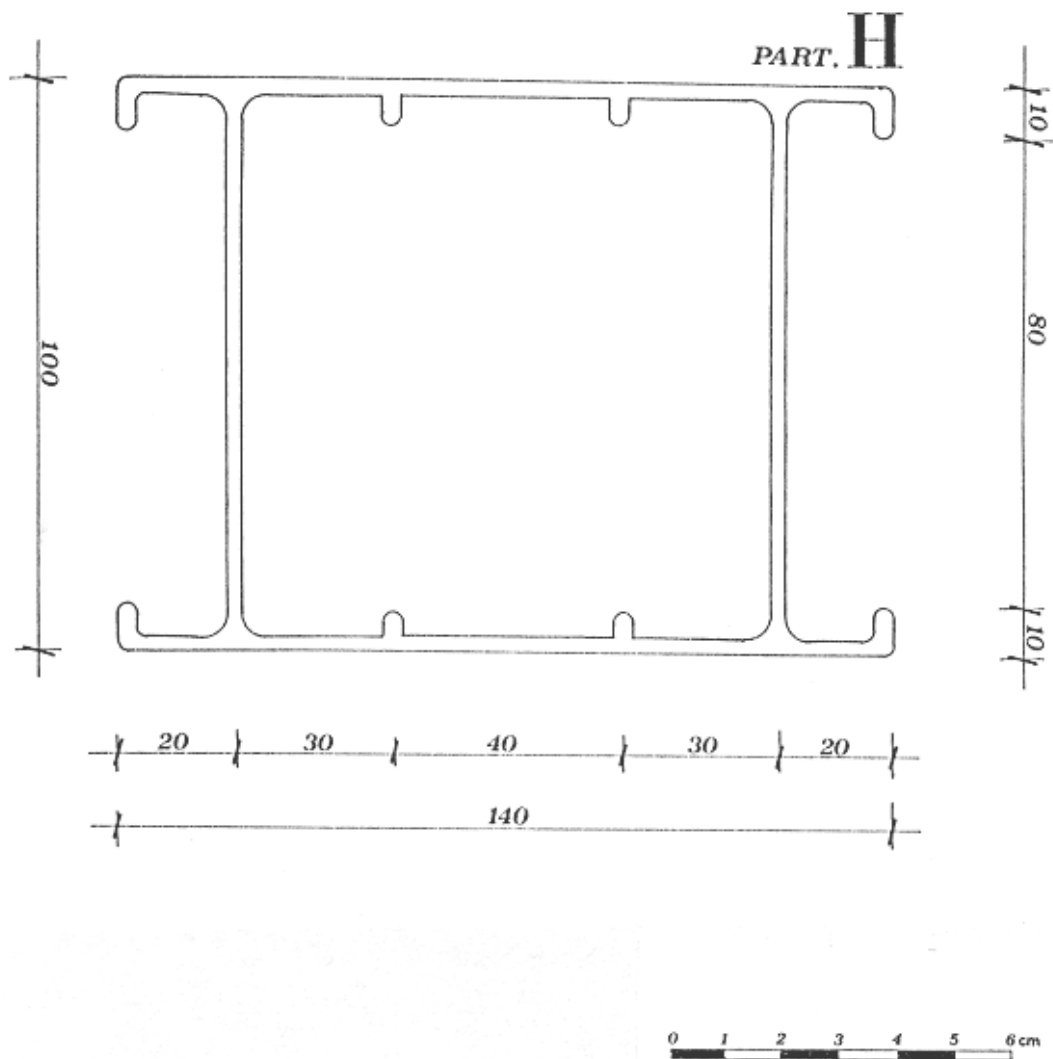
Part. **B**

Tav. 32 bis Particolare dell'incastro del coperchio (B)
La tavola evidenzia il particolare relativo al giunto a incastro elastico tra coperchio e componente (riduzione fotostatica da originale su lucido dell'autore in scala 5:1).

Tav. 33 Particolare del giunto a incastro elastico inferiore (A, C)
La tavola evidenzia il particolare del giunto a incastro elastico inferiore, disegnato sul tipo del giunto cilindrico, che permette l'unione di due elementi estrusi affiancati. Il giunto è calcolato in modo da resistere al getto di calcestruzzo durante le operazioni di messa in opera del solaio (riduzione fotostatica da originale su lucido dell'autore in scala 5:1).

Part. E

Tav. 34 Particolare del giunto elastico superiore (E)

La tavola evidenzia il particolare del giunto a incastro elastico superiore, disegnato sul tipo del giunto cilindrico, che permette di assemblare due elementi estrusi ribaltati uno rispetto all'altro per la realizzazione di setti (riduzione fotostatica da originale su lucido dell'autore in scala 5:1).

Part. F

Tav. 34 bis Particolare del giunto elastico superiore (F)
La tavola evidenzia il particolare del giunto a incastro elastico superiore, disegnato sul tipo del giunto cilindrico, che permette di assemblare due elementi estrusi ribaltati uno rispetto all'altro per la realizzazione di setti (riduzione fotostatica da originale su lucido dell'autore in scala 5:1).

Tav. 35 Esempio applicativo per setto murario
La tavola evidenzia un esempio applicativo relativo alla realizzazione di setti murari con elementi estrusi in plastica riciclata. Gli elementi vengono uniti uno rovesciato rispetto all'altro, in modo tale da poter gettare il calcestruzzo all'interno delle zone di connessione e/o dei comparti centrali che fungono, inoltre, da asole per impianti e scarichi (riduzione fotostatica da originale su lucido dell'autore in scala 1:5).

Tav. 36 Elemento estruso base in plastica riciclata eterogenea
La tavola evidenzia la sezione di un elemento estruso in plastica riciclata eterogenea, utilizzabile per realizzare tramezze mobili per interni (riduzione fotostatica da originale su lucido dell'autore in scala 1:1).

PART. H

10
80
10
100

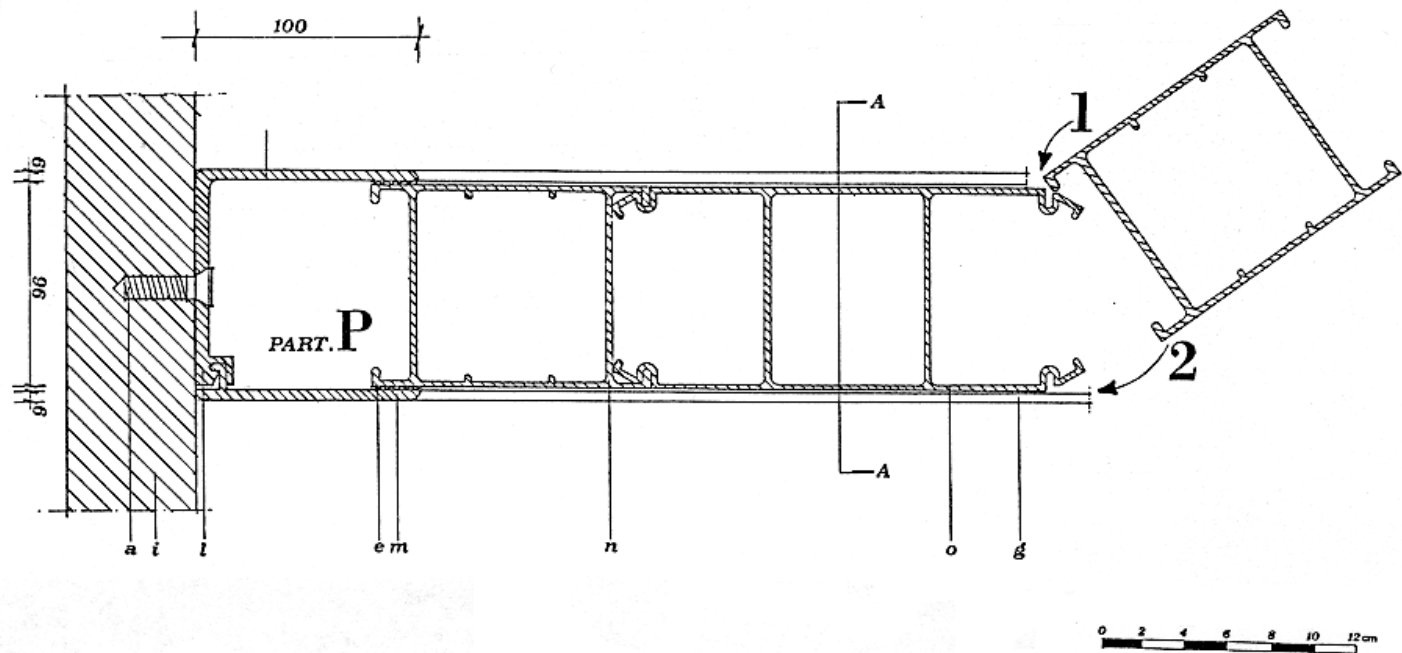
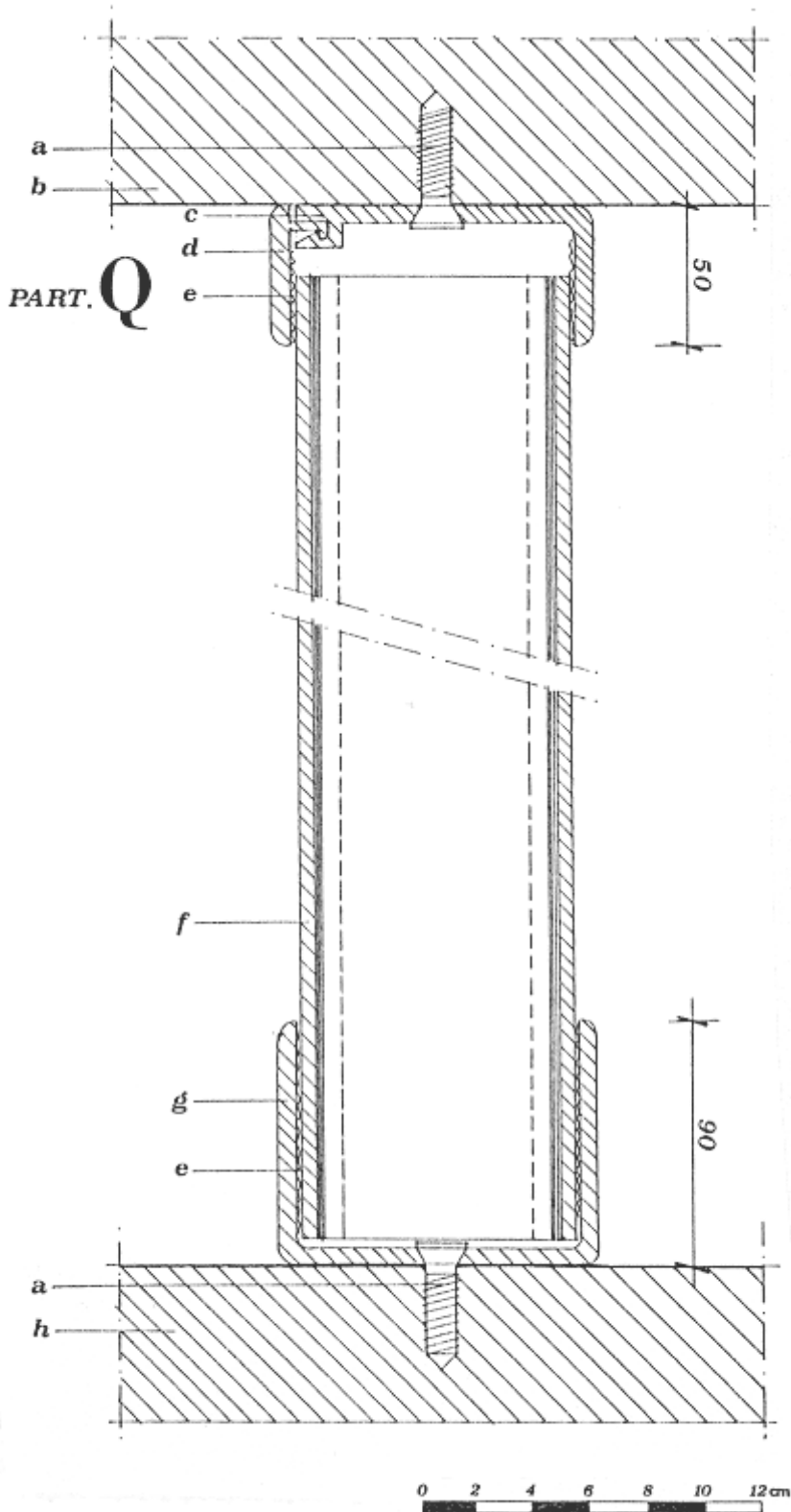
20 30 40 30 20

140

Tav. 37 Profilo di connessione in plastica riciclata eterogenea
La tavola evidenzia la sezione di un elemento estruso in plastica riciclata eterogenea, utilizzabile come profilo di connessione per realizzare tramezze mobili per interni (riduzione fotostatica da originale dell'autore in scala 1:1).

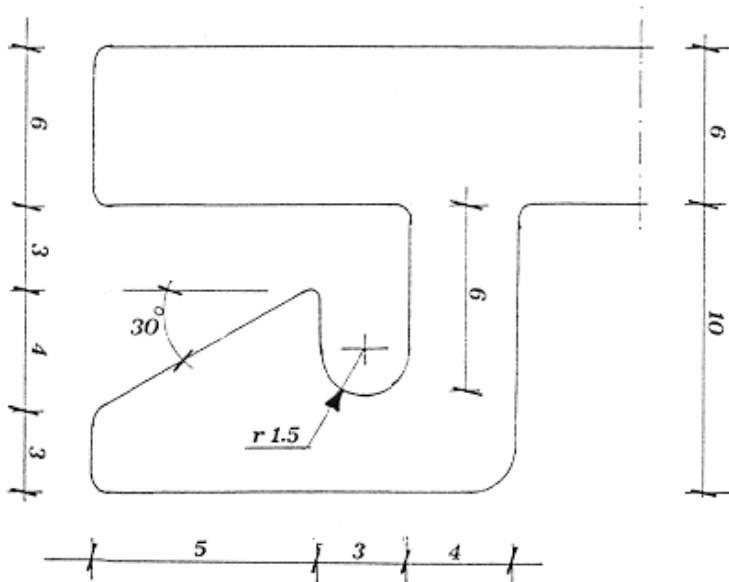
Part. **G**

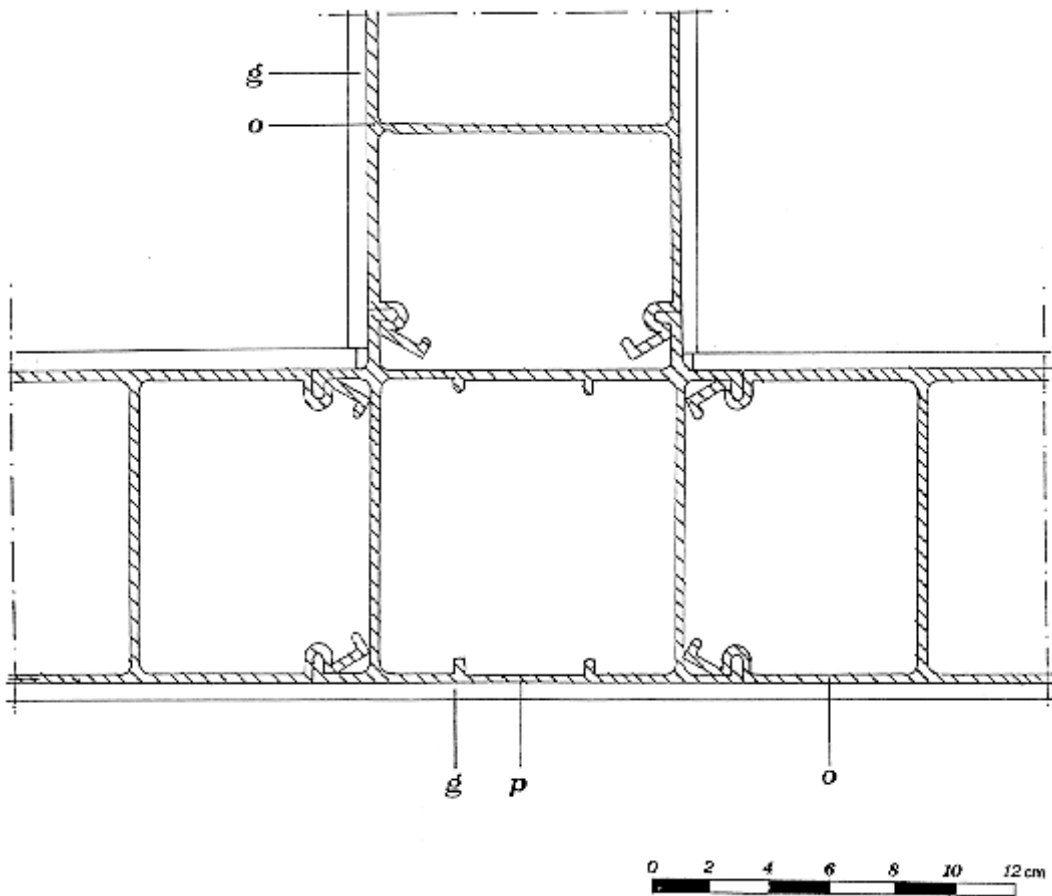
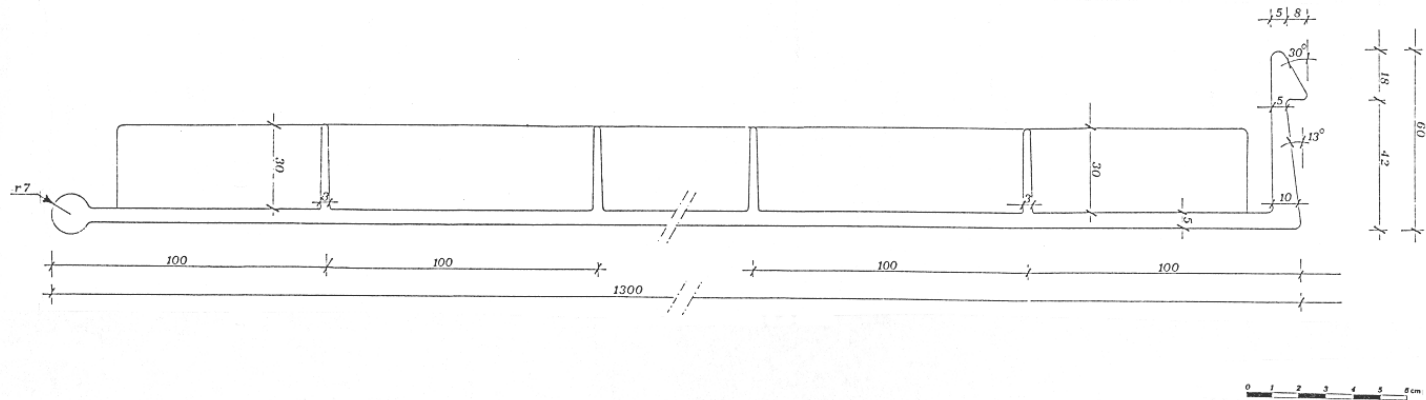
Tav. 38 Particolare del giunto a incastro elastico tra profili (G)
La tavola evidenzia il particolare del giunto a incastro elastico che permette l'unione tra il profilo base e il profilo di connessione nel sistema di elementi estrusi in plastica riciclata eterogenea per tramezze mobili per interni (riduzione fotostatica da originale dell'autore su lucido in scala 5:1).

Part. **H**

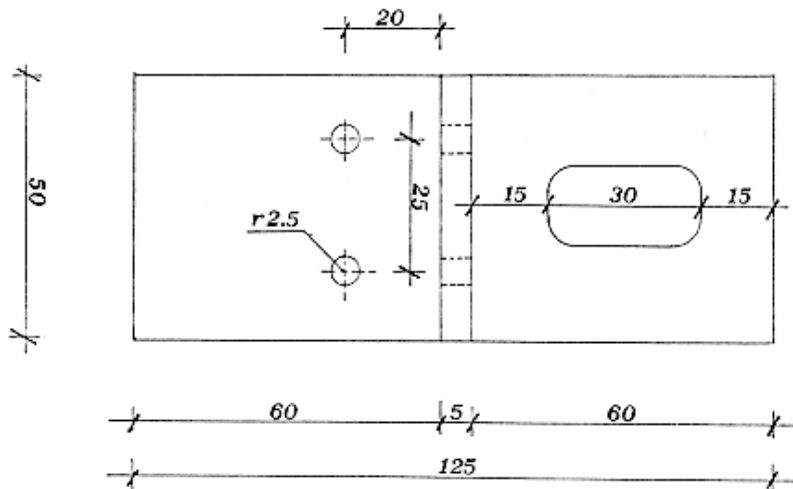
Tav. 38 bis Particolare del giunto a incastro elastico (H)
La tavola evidenzia il particolare del giunto a incastro elastico che permette l'unione tra il profilo base e il profilo di connessione nel sistema di elementi estrusi in plastica riciclata eterogenea per tramezze mobili per interni (riduzione fotostatica da originale dell'autore su lucido in scala 5:1).

Tav. 39 Assemblaggio della tramezza mobile per interni
La tavola evidenzia il movimento di assemblaggio degli elementi costituenti la tramezza mobile per interni: la tramezza viene fissata alle murature perimetrali e al plafone per mezzo di un profilo a L con coprifilo incastrato, mentre viene fissato a pavimento per mezzo di un profilo a U.
Legenda: a) vite tipo Ph (UNI 6957), e) sigillante siliconico, g) profilo estruso a U in plastica riciclata eterogenea (h 90 mm), i) parete in muratura, l) profilo estruso a L in plastica riciclata eterogenea (h 100 mm), m) coprifilo estruso in plastica riciclata eterogenea (h 100 mm) per incastro parete/profilo a L, n) profilo estruso di connessione, o) profilo estruso base;
(riduzione fotostatica da originale dell'autore su lucido in scala 1:2).

Tav. 40 Particolare dell'ancoraggio tramezza, plafone e pavimento
La tavola evidenzia l'ancoraggio della tramezza mobile per interni a plafone e pavimento: la tramezza viene fissata al plafone per mezzo di un profilo a L con coprifilo incastrato e al pavimento per mezzo di un profilo a U.
Legenda: a) vite tipo Ph (UNI 6957), b) plafone, c) profilo estruso a L in plastica riciclata eterogenea (h 50 mm), d) coprifilo estruso in plastica riciclata eterogenea (h 50 mm) per incastro parete/profilo, e) sigillante siliconico, f) tramezzo in plastica riciclata, g) profilo estruso a U in plastica riciclata eterogenea (h 90 mm), h) pavimento, i) parete in muratura, l) profilo estruso a L in plastica riciclata eterogenea (h 100 mm), m) coprifilo estruso in plastica riciclata eterogenea (h 100 mm) per incastro parete/profilo a L, n) profilo estruso di connessione, o) profilo estruso base;
(riduzione fotostatica da originale dell'autore su lucido in scala 1:2).

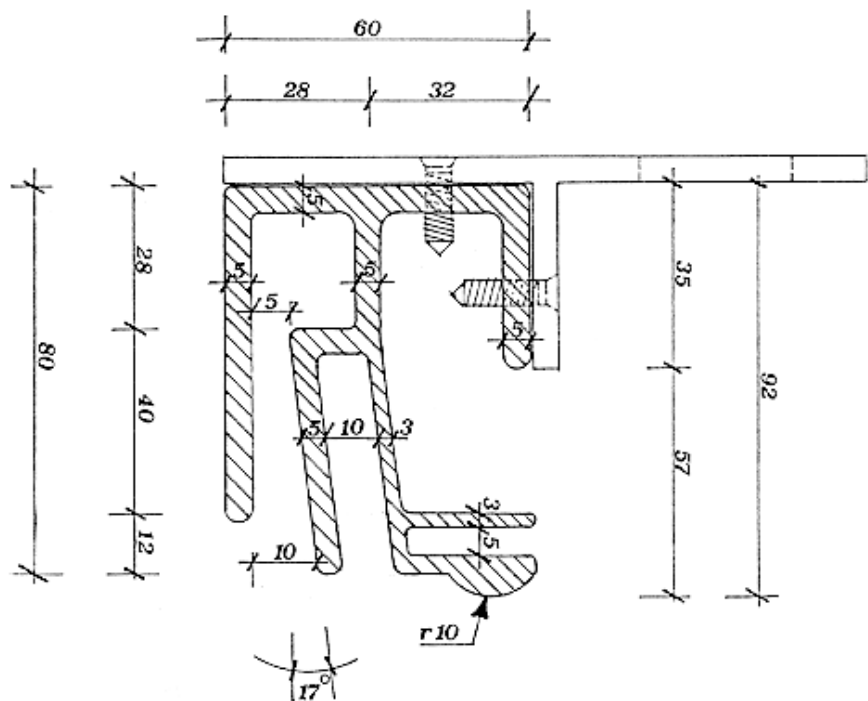
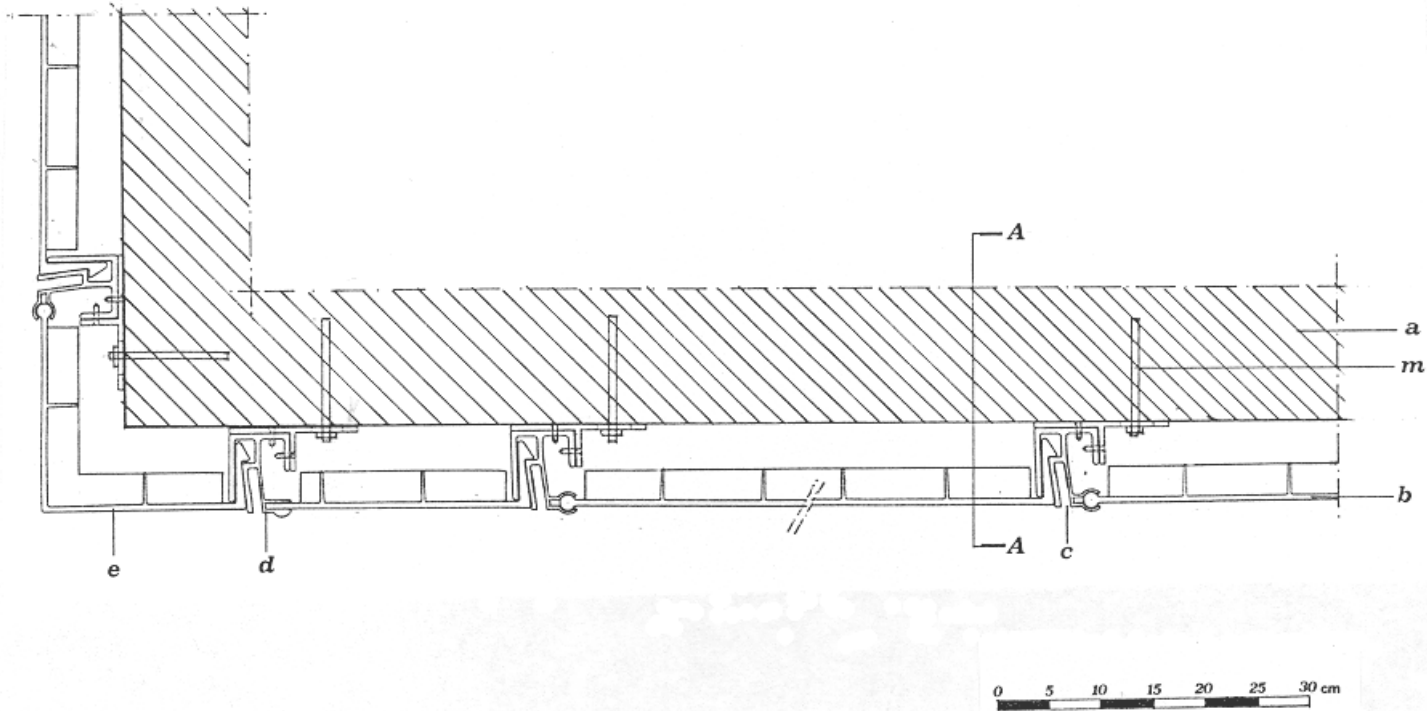
Part. **P**

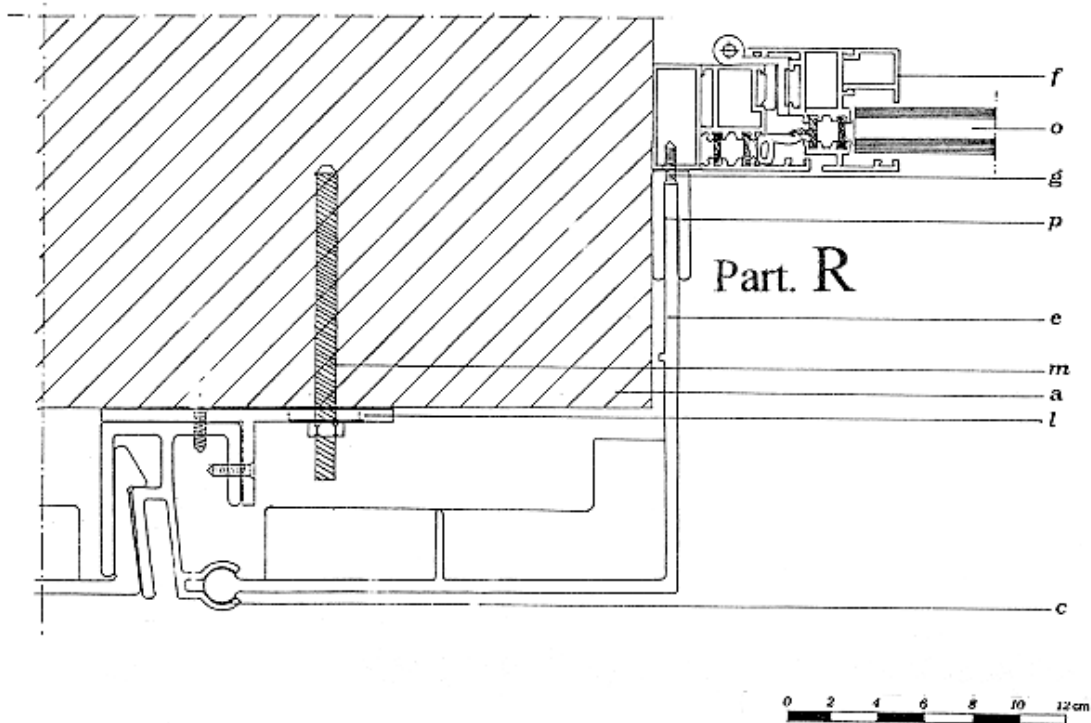
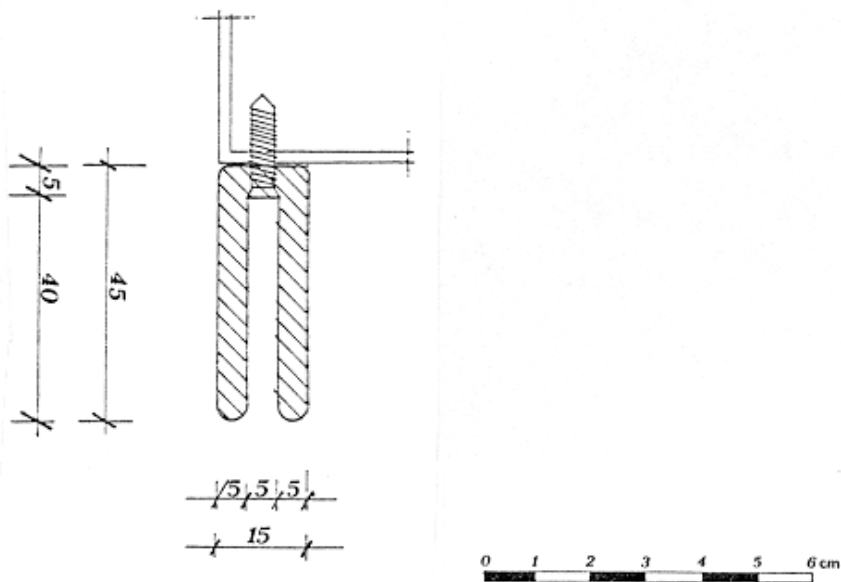
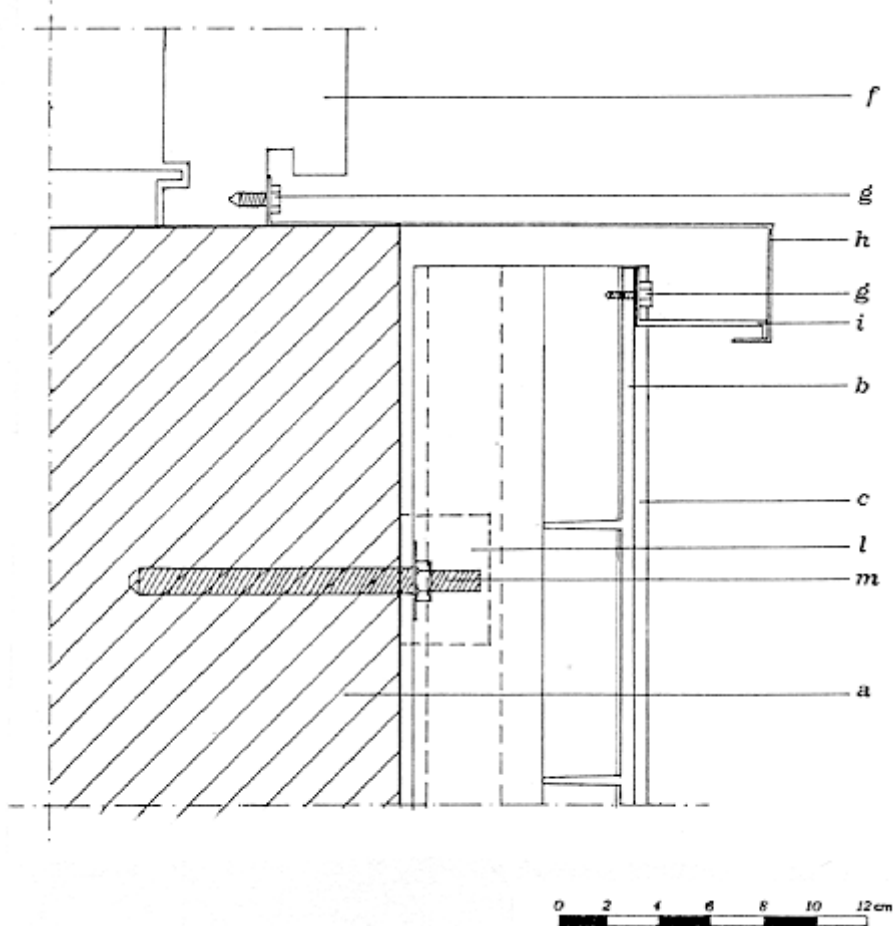
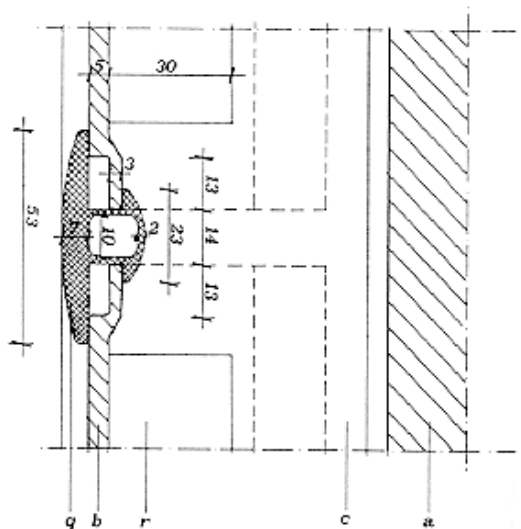
Tav. 41 Particolare degli incastri nei profili estrusi a L (P)
La tavola evidenzia il particolare dell'incastro nel profilo estruso a L in plastica riciclata eterogenea per l'ancoraggio della tramezza alle pareti perimetrali (riduzione fotostatica da originale su lucido dell'autore in scala 5:1).

Part. **Q**

Tav. 41 bis Particolare degli incastri nei profili estrusi a L (Q)
La tavola evidenzia il particolare dell'incastro nel profilo estruso a L in plastica riciclata per l'ancoraggio della tramezza a plafone (riduzione fotostatica da originale su lucido dell'autore in scala 5:1).

Tav. 42 Raccordo tra tramezze d'angolo
La tavola evidenzia il particolare del raccordo, per mezzo del profilo di connessione speciale a T, di due tramezze d'angolo.
Legenda: g) profilo estruso a U in plastica eterogenea, o) profilo estruso base, p) profilo di connessione a T in plastica riciclata eterogenea;
(riduzione fotostatica da originale su lucido dell'autore in scala 1:2).

Tav. 43 Elemento stampato in tecnopolimero riciclato
La tavola evidenzia la sezione di un elemento stampato in polifenilossido (PPO) riciclato, utilizzabile come pannello di tamponamento esterno. Il pannello, largo 1300 mm e alto 3050 mm, presenta delle nervature incrociate (passo 100 mm) che garantiscono all'elemento una inerzia equivalente a un pannelo di tamponamento della serie MEG - Abet Laminati di spessore 10 mm. Il pannello viene assemblato tramite due giunti a incastro elastico, un giunto a trave rastremata e un giunto sferico, a profili di connessione ancorati alla muratura (riduzione fotostatica da originale su lucido dell'autore in scala 1:1).

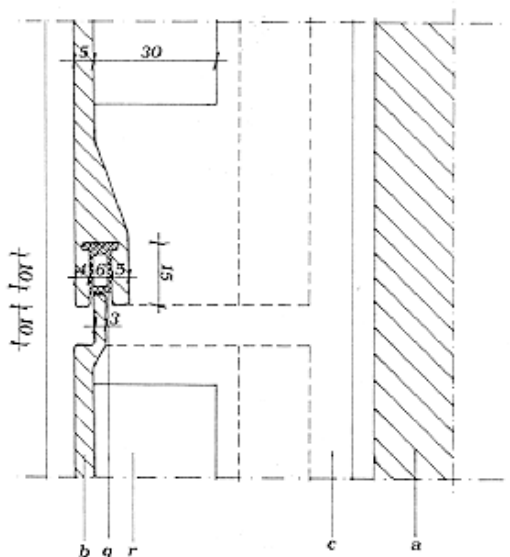
Tav. 44 Profilo estruso di supporto

La tavola evidenzia la sezione del profilo di supporto estruso in polifenilossido (PPO) riciclato (Part. A). Il profilo viene ancorato alla muratura tramite staffe in acciaio ad esso avvitate (Tav. 44 bis). Sul profilo vi sono una zona per l'alloggiamento del giunto a trave rastremata e una zona per l'alloggiamento del giunto sferico: interposto a queste due zone vi è il giunto di dilatazione necessario ad assorbire le deformazioni termiche del materiale (riduzione fotostatica da originale su lucido dell'autore in scala 1:1).

Part. B

Tav. 44 bis Staffa d'ancoraggio
La tavola evidenzia la sezione della staffa in acciaio (Part. B) tramite la quale il profilo di supporto estruso in polifenilossido (PPO) riciclato, avvitato, viene ancorato alla muratura (riduzione fotostatica da originale su lucido dell'autore in scala 1:1).

Tav. 45 Profilo estruso terminale di supporto
La tavola evidenzia la sezione del profilo terminale di supporto estruso in polifenilossido (PPO) riciclato (Part. A). Il profilo viene ancorato alla muratura tramite staffe in acciaio ad esso avvitate (Tav. 44 bis). Sul profilo vi sono una zona per l'alloggiamento del giunto a trave rastremata e una zona per l'alloggiamento del pannello tagliato alla misura necessaria per completare la parete: interposto a queste due zone vi è il giunto di dilatazione necessario ad assorbire le deformazioni termiche del materiale (riduzione fotostatica da originale su lucido dell'autore in scala 1:1).

Tav. 46 Esempio applicativo per tamponamento esterno
La tavola evidenzia un esempio di applicazione su una parete d'angolo del pannello di tampomento in polifenilossido (PPO) riciclato.
Legenda: a) parete in muratura, b) pannello stampato in polifenilossido (PPO) riciclato, c) profilo estruso di supporto in polifenilossido (PPO) riciclato, d) profilo estruso terminale di supporto in polifenilossido (PPO) riciclato, e) pannello stampato angolare in polifenilossido (PPO) riciclato, m) fissaggio chimico; (riduzione fotostatica da originale su lucido dell'autore in scala 1:5).

Tav. 47 Pannello angolare stampato in polifenilossido (PPO) riciclato
La tavola evidenzia la sezione del pannello angolare stampato in polifenilossido (PPO) riciclato. Il pannello, largo 200 mm e alto 3050 mm, presenta nervature incrociate e viene assemblato, per mezzo di giunti a incastro elastico, al profilo estruso di supporto (riduzione fotostatica da originale su lucido dell'autore in scala 1:1).

Tav. 48 Finitura della spalla verticale della finestra
La tavola evidenzia la finitura della spalla verticale della finestra con l'elemento stampato angolare in polifenilossido (PPO) riciclato. Il pannello viene fissato al serramento tramite un profilo di connessione estruso avvitato al telaio dell'infisso (Part. R, Tav. 48 bis).
Legenda: a) parete in muratura, c) profilo estruso di supporto in polifenilossido (PPO) riciclato, e) pannello stampato angolare in polifenilossido (PPO) riciclato, f) serramento in alluminio, g) vite autofilettante, l) staffa di sostegno in acciaio, m) fissaggio chimico, o) vetrocamera, p) profilo di connessione al serramento in polifenilossido (PPO) riciclato;
(riduzione fotostatica da originale su lucido dell'autore in scala 1:2).

Tav. 48 bis Profilo di connessione estruso (R)
La tavola evidenzia il profilo di connessione estruso in PPO riciclato che, avvitato al telaio dell'infisso, permette di fissare l'elemento stampato angolare di finitura della spalla verticale della finestra;
(riduzione fotostatica da originale su lucido dell'autore in scala 1:1).

Tav. 49 Finitura sottofinestra del tamponamento esterno
La tavola evidenzia la finitura sottofinestra del tamponamento esterno con pannelli in stampati in polifenilossido (PPO) riciclato: il pannello viene tagliato a misura del parapetto.
Legenda: a) parete in muratura, b) pannello stampato in polifenilossido (PPO) riciclato, c) profilo estruso di supporto in polifenilossido (PPO) riciclato, f) serramento in alluminio, g) vite autofilettante, h) cartella sagomata di finitura in lamiera d'acciaio preverniciata, i) profilo di sostegno in acciaio per cartella sagomata, l) staffa di sostegno in acciaio, m) fissaggio chimico;
(riduzione fotostatica da originale su lucido dell'autore in scala 1:2).

Soluzione A

Tav. 50 Giunto di dilatazione orizzontale
La tavola evidenzia la soluzione A per il giunto orizzontale necessario per assorbire le dilatazioni termiche del pannello di tamponamento. Essa prevede l'utilizzo di un coprigiunto strutturale in neoprene inserito a pressione tra due alette sagomate nella parte inferiore e superiore del pannello.
Legenda: a) parete in muratura, b) pannello stampato in polifenilossido (PPO) riciclato, c) profilo estruso di supporto in polifenilossido (PPO) riciclato, q) elemento in neoprene, r) nervatura;
(riduzione fotostatica da originale su lucido dell'autore in scala 1:1).

Soluzione B

Tav. 51 Giunto di dilatazione orizzontale

La tavola evidenzia la soluzione B per il giunto orizzontale necessario per assorbire le dilatazioni termiche del pannello di tamponamento. Essa prevede l'utilizzo di un collegamento maschio - femmina, con interposta una guarnizione in neoprene inserita a pressione in una guida sagomata sul lato superiore del pannello stampato.

Legenda: a) parete in muratura, b) pannello stampato in polifenilossido (PPO) riciclato, c) profilo estruso di supporto in polifenilossido (PPO) riciclato, q) elemento in neoprene, r) nervatura;

(riduzione fotostatica da originale su lucido dell'autore in scala 1:1).

Attilio Citterio (1964) si diploma in chimica tintoria nel 1983 e lavora per alcuni anni nell'industria chimica. Nel 1996 si laurea in architettura, con massima votazione e lode, con una tesi sul riciclo delle materie plastiche in edilizia, tesi per la quale riceve il Premio di Laurea 1996 dalla Fondazione Architetto Augusto Rancilio. È cultore della materia presso la Facoltà di Architettura del Politecnico di Milano, nel corso di Tecnologia dell'Architettura II ann. tenuto dal Prof. Guido Nardi. Svolge attività di ricerca presso il Dipartimento di Disegno Industriale e di Tecnologia dell'Architettura del Politecnico di Milano.